

ALEX SORIA MEDINA

UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA
DE FORMAS ARQUITETÔNICAS PLANAS UTILIZANDO DADOS PROVENIENTES
DE LASER ESCANER TERRESTRE

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau e título de Doutor em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes

CURITIBA
2012

Soria Medina, Alex

Uma proposta de metodologia para a extração semi-automática de formas arquitetônicas planas utilizando dados provenientes de laser escaner terrestre / Alex Soria Medina. – Curitiba, 2012.

149 f. : il.; tab.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Alzir Felipe Buffara Antunes

1. Edificações – Levantamentos topográficos – Sistemas de varredura. I. Antunes, Alzir Felipe Buffara. II. Título.

CDD 526.98250284

TERMO DE APROVAÇÃO

ALEX SORIA MEDINA


*"UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA
DE FORMAS ARQUITETÔNICAS PLANAS UTILIZANDO DADOS PROVENIENTES
DE LASER ESCANER TERRESTRE",*

Tese nº 80 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Hélio Pedrini
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP


Prof. Dr. Maurício Galo
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Profª. Drª. Cristina de Araújo Lima
Departamento de Arquitetura, UFPR


Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado
Departamento de Geomática, UFPR


Profª. Drª. Maria Cecília Bonato Brandalize
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 24 de maio de 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade e disponibilidade dos recursos necessários à execução deste trabalho.

Ao professor Alzir Felipe Buffara Antunes pela orientação, apoio e principalmente pelo incentivo e confiança em mim depositados.

A todos os colegas do Departamento de Geomática, pela oportunidade de discussão de assuntos pertinentes ao trabalho e pela troca de ideias que permitiram concluir este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo fomento financeiro do estágio de doutorando junto a Universidade de Vigo – Espanha.

Ao Professor Pedro Arias da Universidade de Vigo por ter me acolhido junto ao seu grupo e pelo suporte à pesquisa.

À Simone, Ana Paula e Maria Fernanda, por todo o carinho, paciência e incentivo.

RESUMO

A extração das formas arquitetônicas a partir de dados adquiridos através de Laser Escaner Terrestre (LET) é um trabalho que exige muita pesquisa, e a segmentação da nuvem de pontos constitui um dos procedimentos mais importantes deste processo. O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e implementar uma metodologia capaz de detectar e extrair de forma semi-automática os contornos de formas arquitetônicas planas de edificações, com em vistas à automação do processo de intervenção em fachadas de edificações históricas. As áreas escolhidas para o desenvolvimento da pesquisa foram às fachadas do Paço Quiñones de León, localizada na cidade de Vigo – Espanha e do Palácio Giuseppe Garibaldi, localizada na Cidade de Curitiba – Brasil. Para atender o escopo deste trabalho, a metodologia proposta é baseado no algoritmo RANSAC (**RAN**dom **SA**mples **C**onsensus) e na triangulação de Delaunay. Os resultados obtidos com a metodologia proposta foram comparados com levantamentos topográficos realizados sobre as mesmas fachadas e os seus resultados avaliados através um teste estatístico. Conclui-se que a contribuição desta metodologia jaz na escolha do tipo de algoritmo e dos resultados obtidos o qual tem a capacidade de automatizar os levantamentos de fachadas principalmente na etapa de escritório que em geral consome mais tempo. Finalmente, através deste trabalho espera-se que o uso do LET na produção da documentação técnica precisa de modelos geométricos, possam alimentar as bases de dados de edificações e sítios arqueológicos, históricos e culturais no Brasil.

Palavras-chave: Laser Escaner Terrestre. Extração de formas arquitetônicas. *RAN*dom *SA*mples *C*onsensus. Topografia. Documentação de patrimônio arquitetônico.

ABSTRACT

The extraction of architectural forms from data acquired by Terrestrial Laser Scanner (TLS) is a work that still requires a great deal of research. The segmentation of the point clouds is one of the most important topics of proposed methodology. The key objective of this study was to develop and implement a methodology able to detect and extract in a semi-automatic way of the contours of architectural forms from the façades of historic buildings. The study area was facades of the Palace Quinones of Leon, located in Vigo - Spain and Giuseppe Garibaldi Palace, located in the city of Curitiba - Brazil. The proposed methodology is based on the algorithm RANSAC (Random Sample Consensus) and the Delaunay triangulation. Features extraction resulted from this method were compared with conventional surveys performed on the same facades. The accuracy assessment was done by means of statistical procedures. The Contribution of this method lies in choosing the type of algorithm and the results obtained. It has the capability to semi-automate the extraction of features and facilitating the traditional drawing effort that is generally timing consuming. Finally, this work shows that use the TLS can provide the data acquisition from building and monuments and supply its the cadastral data base.

Key words: Terrestrial Laser Scanner. Extraction of architectural forms. Random Sample Consensus. Topography. Documentation of the architectural heritage.

RESÚMEN

La extracción de las formas arquitectónicas en datos adquiridos por Laser Escáner Terrestre es un trabajo muy complejo y la segmentación de la nube de puntos es uno de los pasos más importante en este proceso. El presente estudio tiene como principal objetivo desarrollar e implementar una metodología capaz de detectar y extraer de forma semi-automática los contornos de las formas arquitectónicas planas de edificios, con miras a la automatización del proceso de intervención en las fachadas de los edificios históricos. Las áreas escogidas para el desarrollo de la investigación fueron las fachadas del Pazo Quiñones de León, ubicado en la ciudad de Vigo – España y el Palacio Giuseppe Garibaldi en la ciudad de Curitiba o Brasil. Para cumplir con el objetivo, la metodología propuesta se basa en el algoritmo de RANSAC (RANdom SAmple Consensus) y en la triangulación de Delaunay. Los resultados obtenidos con la metodología propuesta fueron comparados con levantamientos topográficos sobre las mismas fachadas y los resultados de esta comparación son evaluados por un test estadístico. Concluyese que la contribución de la metodología reposa sobre la elección del tipo de algoritmo y de los resultados obtenidos, tiene la capacidad de automatizar los levantamientos de fachadas, principalmente el trabajo de oficina que generalmente lleva más tiempo. Por último, con este trabajo se espera que se utilices los LET en la producción de documentación técnica, de modelos tridimensionales, dibujos y elevaciones para el catastro y todavía puedan alimentar las bases de datos de edificios y sitios arqueológicos, históricos y culturales en Brasil.

Palabras - Clave: Laser Escáner Terrestre. Extracción de formas arquitectónicas. *RANdom SAmple Consensus*. Topografía. Documentación del patrimonio arquitectónico.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LEVANTAMENTO POR TRIANGULAÇÃO	29
FIGURA 2 - LEVANTAMENTO FOTOGRAMETRICO DA IGREJA DE SÃO FRANCISCO DA PENITÊNCIA – RIO DE JANEIRO – ELEVAÇÃO COTADA	30
FIGURA 3 - LEVANTAMENTO LASER DO TEATRO PAIOL - CURITIBA - PR.....	33
FIGURA 4 - LEVANTAMENTO LASER DA IGREJA DE SÃO FRANCISCO - SALVADOR - BA.....	34
FIGURA 5 - LEVANTAMENTO LASER DA AV. BERNARDO MONTEIRO BELO HORIZONTE – MG.	35
FIGURA 6 - LEVANTAMENTO LASER DO PAÇO MUNICIPAL CURITIBA - PR....	35
FIGURA 7 - LEVANTAMENTO LASER DO PAÇO IMPERIAL PRAÇA XV - RIO DE JANEIRO.....	36
FIGURA 8 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DAS COORDENADAS 3D DE UM PONTO	38
FIGURA 9 - COMPONENTES DO DISTANCIÔMETRO DOS ESCANERS DE TEMPO DE VOO.....	40
FIGURA 10 -PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE TEMPO DE VOO.....	40
FIGURA 11 -ESQUEMA DE UM ESCANER DO TIPO TEMPO DE VOO	42
FIGURA 12 -MODELOS DE ESCANER DE TEMPO DE VOO.....	43
FIGURA 13 -ESQUEMA DO MÉTODO DA DIFERENÇA DE FASE	43
FIGURA 14 -LASER ESCANER DE DIFERENÇA DE FASE a) LEICA HDS - 4500 e b) IMAGER - 5003.....	45
FIGURA 15 -ESQUEMA DE UM ESCANER DE TRIANGULAÇÃO	45
FIGURA 16 -LASER ESCANER DE TRIANGULAÇÃO a) MINOLTA VIVID – 910 b) CALLIDUS CT - 180	47
FIGURA 17 -DISTRIBUIÇÃO DE ALVOS	49
FIGURA 18 -ALVO COM RANHURAS	50
FIGURA 19 -QUALIDADE DAS BORDAS	51
FIGURA 20 -SEGMENTAÇÃO POR AGRUPAMENTO DE FEIÇÕES a) DADOS BRUTOS, b) DADOS AGRUPADOS.....	55
FIGURA 21 -SEGMENTAÇÃO POR CRESCIMENTO DE REGIÕES	57

FIGURA 22 - OS DOIS ESPAÇOS DA TRANSFORMADA 3D DE HOUGH	
a) O ESPAÇO EUCLIDIANO, b) O ESPAÇO DOS PARÂMETROS.	59
FIGURA 23 - CILINDROS E PLANOS EXTRAÍDOS DE UMA CENA INDUSTRIAL.	60
FIGURA 24 - RESULTADO DA EXTRAÇÃO DOS PLANOS DE TELHADOS	
a) RANSAC; b) TRANSFORMADA 3D DE <i>HOUGH</i>	61
FIGURA 25 - DETECÇÃO SEQUENCIAL DE PLANOS USANDO RANSAC	62
FIGURA 26 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY COM CÍRCULOS-	
CIRCUNDANTES	65
FIGURA 27 - SUPERPOSIÇÃO ENTRE AS CELULAS DO DIAGRAMA DE	
VORONOI E A TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY.	66
FIGURA 28 - LOCAIZAÇÃO DA GALICIA E PARQUE DE CASTRELOS – VIGO –	
ESPANHA	68
FIGURA 29 - PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	68
FIGURA 30 - PALÁCIO GUISEPPE GARIBALDI	69
FIGURA 31 - LOCALIZAÇÃO DO PALACIO GUISEPPE GARIBALDI	70
FIGURA 32 - ETAPAS DA DETERMINAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DAS FORMAS	
ARQUITETÔNICAS ATRAVÉS DE DADOS LET	76
FIGURA 33 - NUVEM DE PONTOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	77
FIGURA 34 - NUVEM DE PONTOS – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	77
FIGURA 35 - SISTEMAS DE COORDENADAS PARA O PROCESSAMENTO DA	
FACHADA	87
FIGURA 36 - HISTOGRAMAS DA NUVEM DE PONTOS	87
FIGURA 37 - SEQUÊNCIA DA EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS DA	
METODOLOGIA DESENVOLVIDA.	90
FIGURA 38 - BORDAS EXTERNAS E INTERNAS OBTIDAS POR MEIO DA	
TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY	91
FIGURA 39 - VETORIZAÇÃO DAS BORDAS EXTERNAS E INTERNAS	92
FIGURA 40 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 100 mm	96
FIGURA 41 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 50 mm	97
FIGURA 42 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 10 mm	97
FIGURA 43 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 10 mm –	
PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	99

FIGURA 44 - HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO 1D DOS PONTOS DA NUVEM NÃO ORIENTADA À ESQUERDA E DA NUVEM ORIENTADA À DIREITA	100
FIGURA 45 - NUVEM NÃO ORIENTADA (VERDE) E NUVEM ORIENTADA (TONS DE CINZA)	100
FIGURA 46 - NUVEM DE PONTOS APÓS A FILTRAGEM DOS DADOS – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	101
FIGURA 47 - HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DA NUVEM FILTRADA.....	101
FIGURA 48 - NUVEM DE PONTOS APÓS A FILTRAGEM DOS DADOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	102
FIGURA 49 - PLANO SEGMENTADO – TORRES.....	103
FIGURA 50 - PLANO SEGMENTADO – JANELAS E PORTA	104
FIGURA 51 - COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PLANOS SEGMENTADOS – QUIÑONES DE LEÓN	104
FIGURA 52 - COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PLANOS SEGMENTADOS A PARTIR DE OUTRO PONTO DE VISTA	105
FIGURA 53 - ORNAMENTOS DA PAREDE CENTRAL	106
FIGURA 54 - PLANO SEGMENTADO – PAREDE PRINCIPAL – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	107
FIGURA 55 - COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PLANOS SEGMENTADOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	107
FIGURA 56 - SEQUÊNCIA DA EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS.....	108
FIGURA 57 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY - PLANO DAS JANELAS E DA PORTA DA FACHADA	109
FIGURA 58 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY - TORRES DA FACHADA.....	110
FIGURA 59 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY – PAREDE CENTRAL DA FACHADA.....	110
FIGURA 60 - PONTOS DE CONTORNO - DAS TORRES	111
FIGURA 61 - PONTOS DE CONTORNO - PAREDE CENTRAL.....	111
FIGURA 62 - VETORIZAÇÃO DOS CONTORNOS.....	112
FIGURA 63 - DETALHE DA VETORIZAÇÃO DOS CONTORNOS	113
FIGURA 64 - EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS DAS FORMAS ARQUITETÔNICAS	114

FIGURA 65 - FACHADA COTADA – QUIÑONES DE LEÓN.....	114
FIGURA 66 - FACHADA – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	115
FIGURA 67 - JANELAS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	
a) INFERIOR b) SUPERIOR	115
FIGURA 68 - PONTOS DA FACHADA OBTIDOS POR LEVANTAMENTO	
TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	116
FIGURA 69 - REPRESENTAÇÃO DA FACHADA OBTIDA POR LEVANTAMENTO	
TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	117
FIGURA 70 - SOBREPOSIÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES DA FACHADA.....	117
FIGURA 71 - DETALHE DA SOBREPOSIÇÃO DOS LEVANTAMENTOS.....	118
FIGURA 72 - JANELA SUPERIOR – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	
a) NUVEM DE PONTOS b) SEGMENTAÇÃO	
c) CONTORNOS d) LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	119
FIGURA 73 - REPRESENTAÇÃO DA FACHADA OBTIDA POR LEVANTAMENTO	
TOPOGRÁFICO – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI	123
FIGURA 74 - TRÊS BRASÕES DA FACHADA PAÇO QUIÑONES DE LEÓN.....	126
FIGURA 75 - BRASÃO DA PAREDE CENTRAL DO PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	
a) FOTOGRAFIA b) NUVEM SEGMENTADA c) CONTORNO	
PRINCIPAL d) COMPOSIÇÃO DOS CONTORNOS.....	127
FIGURA 76 - BRASÃO DA TORRE DIREITA DO PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	
a) FOTOGRAFIA b) NUVEM SEGMENTADA c) CONTORNO	
PRINCIPAL d) COMPOSIÇÃO DOS CONTORNOS.....	128
FIGURA 77 - BRASÃO DA TORRE ESQUERDA DO PAÇO QUIÑONES DE LEÓN.	
a) FOTOGRAFIA b) NUVEM SEGMENTADA c) CONTORNO	
PRINCIPAL d) COMPOSIÇÃO DOS CONTORNOS.....	129

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES TIPOS DE LASER ESCANER TERRESTRE	47
TABELA 2 -	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER CYRAX HDS - 3000.....	71
TABELA 3 -	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER RIEGL Z390I.....	72
TABELA 4 -	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ESTAÇÃO LEICA TCR 407	73
TABELA 5 -	CARACTERÍSTICAS DOS LEVANTAMENTOS – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	96
TABELA 6 -	CARACTERÍSTICAS DOS LEVANTAMENTOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI.....	98
TABELA 7 -	MEDIDAS DAS LARGURAS E ALTURAS DAS JANELAS – LEVANTAMENTOS LASER E TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	120
TABELA 8 -	MEDIDAS DAS LARGURAS E ALTURAS DA PORTA E DAS DUAS TORRES – LEVANTAMENTOS LASER E TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN	121
TABELA 9 -	TESTE t PARA COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DE DADOS EMPARELHADOS.	122
TABELA 10 -	MEDIDAS DAS LARGURAS E ALTURAS DAS JANELAS – LEVANTAMENTOS LASER E TOPOGRÁFICO – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI.....	124
TABELA 11 -	COMPARAÇÃO DAS LARGURAS E ALTURAS DA PORTA E DAS DUAS TORRES NOS LEVANTAMENTOS REALIZADOS COM LASER E TOPOGRAFIA.....	125
TABELA 12 -	TESTE T PARA COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DE DADOS EMPARELHADOS.	125
TABELA 13 -	RELAÇÃO ENTRE A ESCALA E O ERRO DE GRAFICISMO.	148

LISTA DE SIGLAS

CAD	–	<i>Computer Aided Design</i>
CCD	–	<i>Charge-Coupled Device</i>
DXF	–	<i>AutoCAD Drawing Exchange Format</i>
FOV	–	<i>Field of View</i>
GPS	–	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
LASER	–	<i>Light Amplification by Emission of Radiation</i>
LIDAR	–	<i>Light Detection and Ranging</i>
LET	–	Laser Escaner Terrestre
TLS	–	<i>Terrestrial Laser Scanner</i>
MDT	–	Modelo Digital de Terreno
2D	–	Bidimensional
3D	–	Tridimensional
RANSAC	–	<i>Random Sample Consensus</i>
UFPR	–	Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 MOTIVAÇÃO	19
1.2.1 Contribuição da Tese	22
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1 DOCUMENTAÇÃO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS	24
2.2 LEVANTAMENTOS DE FORMAS ARQUITETÔNICAS	28
2.3 A UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE VARREDURA LASER NA DOCUMENTAÇÃO DE FORMAS ARQUITETÔNICAS	31
2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LASER ESCANER TERRESTRE	37
2.4.1 Princípio da Varredura a Laser	38
2.4.2 Classificação dos Lasers Escaner Terrestres	39
2.4.2.1 Laser Escaner de tempo de voo	40
2.4.2.2 Laser Escaner de medida da diferença de fase	43
2.4.2.3 Laser Escaner de triangulação	45
2.4.3 Características técnicas dos Lasers Escaner Terrestres	48
2.4.3.1 Acurácia dos Lasers Escaners	48
2.4.3.2 Acurácia angular	48
2.4.3.3 Acurácia linear	49
2.4.3.4 Resolução espacial e alcance	50
2.4.3.5 Efeitos de borda	51
2.4.3.6 Efeitos das condições ambientais	52
2.5 SEGMENTAÇÃO DE FACHADAS A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS	52
2.5.1 Métodos de segmentação	54

2.5.1.1 Segmentação baseada em agrupamento por feições	54
2.5.1.2 Segmentação baseada no crescimento de regiões.....	55
2.5.1.2.1 Identificação da superfície semente	55
2.5.1.2.2 Crescimento da superfície semente	56
2.5.1.3 Segmentação por ajustamento de modelos	58
2.5.1.3.1 Transformada 3D de <i>Hough</i>	58
2.5.1.3.2 RANSAC (<i>RANdom SAmple Consensus</i>)	60
2.5.2 Extração dos contornos das feições.....	64
2.6.2.1 Triangulação de <i>Delaunay</i>	64
3 ÁREAS DE ESTUDO E MATERIAIS	67
3.1 ÁREAS DE ESTUDO	67
3.1.1 Paço Quiñones de León	67
3.1.1 Sociedade Garibaldi	69
3.2 EQUIPAMENTOS.....	70
3.2.1 Laser Escaner Terrestre.....	70
3.2.2. Estação Total	73
3.3 PROGRAMAS UTILIZADOS	74
4 METODOLOGIA	75
4.1 COLETA DOS DADOS LASER.....	76
4.1.1 Densidade de pontos.....	77
4.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS	78
4.2.1 Determinação do plano da fachada.....	84
4.2.2 Determinação dos <i>inliers</i> (pontos válidos pertencentes ao plano).....	85
4.3 ORIENTAÇÃO E FILTRAGEM AUTOMÁTICA	86
4.4 SEGMENTAÇÃO DA FACHADA.....	88
4.5 EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS DAS FEIÇÕES PLANAS.....	89
4.5.1 Identificação dos pontos de contornos do segmentos.....	90
4.5.2 Vetorização dos contornos	92
4.6 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA.....	93

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
5.1 DADOS LASER	95
5.1.1 Paço Quiñones de León	95
5.1.2 Palácio Giuseppe Garibaldi	98
5.2 ORIENTAÇÃO E FILTRAGEM	99
5.3 SEGMENTAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS	102
5.4 DELIMITAÇÃO DOS CONTORNOS DAS FORMAS ARQUITETÔNICAS	108
5.5 VETORIZAÇÃO DOS CONTORNOS	112
5.6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	116
5.6.1. Avaliação dos levantamentos do Paço Quiñones de León	116
5.6.2. Avaliação dos levantamentos do Palácio Giuseppe Garibaldi	122
5.7 Delimitação dos contornos de outras formas arquitetônicas	126
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	131
REFERÊNCIAS	134
ANEXOS	141

1 INTRODUÇÃO

São diversas as metodologias utilizadas para se obter a documentação de monumentos arquitetônicos ou de sítios históricos, que vão desde métodos simples, como o cadastramento realizado através da medição direta (com o uso de trena), para a determinação das grandezas lineares e angulares, com ou sem o apoio topográfico, até levantamentos por varredura Laser, no qual se obtém automaticamente um modelo tridimensional do objeto.

Nos levantamentos por medição direta, apesar de serem simples, são morosos e caros, principalmente quando os monumentos ou sítios a serem levantados são complexos, ou quando há um número significativo de edificações, ou ainda quando se requer um detalhamento acurado.

Os levantamentos por métodos fotogramétricos passam então a ser uma opção para o cadastramento de monumentos e sítios históricos, por serem considerados rápidos e eficazes, porém, necessitam de equipamentos específicos e mão de obra altamente especializada. Métodos fotogramétricos tradicionais tiveram seu auge em aplicações arquitetônicas após a 2ª Guerra Mundial, apesar de seu desenvolvimento datar ainda de meados do século XIX. (MEDINA, 2002).

Em 1964, durante o II^o Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos, foi redigida a Carta de Veneza, que recomenda o uso da Fotogrametria para a obtenção da documentação gráfica de um monumento histórico. Ao final do século XX, com o surgimento da Fotogrametria Digital, esta tarefa se tornou mais ágil, houve uma simplificação dos processos e conseqüentemente uma redução de custos, tendo ainda como vantagem a utilização de equipamentos de uso comum a outras atividades, como computadores e câmeras digitais. (BRITO, 2002).

O procedimento de restituição fotogramétrica através de ferramentas computacionais tem permitido esta tarefa ser realizada por profissionais de diversas áreas de atuação (arquitetos, engenheiros, geólogos, geógrafos, entre outros), não necessitando o profissional possuir larga experiência em Fotogrametria, apesar de necessitar conhecer bem os conceitos e procedimentos fotogramétricos para que se obtenha um trabalho de qualidade.

Ainda neste período, a rápida evolução da tecnologia traz à comunidade novas formas de coletas de dados para a modelagem urbana, como por exemplo, equipamentos de varredura a Laser, tanto terrestres como aerotransportados.

Os primeiros equipamentos por varredura a Laser foram desenvolvidos para fins cartográficos e topográficos, sendo conduzidos em aeronaves, ou seja, equipamentos aerotransportados, denominados LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Tais equipamentos fornecem dados utilizados na geração de modelos digitais de terreno (MDT), porém, também podem ser utilizados na modelagem de coberturas arquitetônicas.

No entanto, se considerarmos apenas dados de varredura LIDAR aerotransportado, os edifícios que são modelados têm uma descrição simplificada, especialmente no que tange às suas fachadas. Para conseguir um melhor detalhamento das fachadas torna-se necessária a utilização de dados provenientes de equipamentos de Laser Escaner Terrestre - LET. Assim, as informações podem ser complementadas e, conseqüentemente, os modelos obtidos anteriormente podem ser refinados. (BOULAASSAL *et al.*, 2007).

Com o advento dos equipamentos Laser Escaner Terrestre, o acesso direto a dados tridimensionais foi facilitado. Recentes desenvolvimentos tornaram os LET mais rápidos e precisos na aquisição de dados, o que tem sugerido pesquisas no sentido de encontrar novas soluções relacionadas à modelagem das formas arquitetônicas de edificações.

Porque, de fato, um LET proporciona a aquisição rápida e automática de milhares de pontos num sistema tridimensional, cobrindo uma grande área independentemente da sua acessibilidade. (TARSHA-KURDI *et al.*, 2007). O resultado deste levantamento é um conjunto de pontos definidos por suas coordenadas tridimensionais, o qual é chamado de “nuvem de pontos”.

Embora a varredura por Laser Escaner Terrestre pareça revolucionária, esta nova tecnologia de aquisição de dados não pode substituir os métodos de levantamentos convencionais citados anteriormente, pois cada um tem suas vantagens e desvantagens, que devem ser conhecidas para poder aproveitar ao máximo cada um deles. Os diversos métodos podem ser complementares na execução de um levantamento arquitetônico.

Como resultado do levantamento por Laser Escaner Terrestre obtém-se um modelo digital do exemplar arquitetônico ou de um sítio histórico, porém, a detecção automática dos contornos que definem as formas arquitetônicas das fachadas é uma questão importante que deve ser pesquisada com o objetivo de “substituir” ou mesmo minimizar o trabalho e o tempo despendido com os demais métodos de levantamento.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consistiu em propor uma metodologia capaz de extrair, de forma semi-automática as formas arquitetônicas planas de fachadas de edificações a partir de dados provenientes de LET, contribuindo assim com o uso adequado desta nova tecnologia, visto que existe carência de trabalhos mais aprofundados na utilização desta tecnologia no Brasil.

O processo consistiu em filtrar a nuvem de pontos e identificar os planos existentes em uma fachada arquitetônica para depois extrair o contornos das formas arquitetônicas presentes em cada plano, usando nestes processos o algoritmo de RANSAC (*RANndom Sample Concensus*) e a triangulação de *Delaunay*.

Depois de terminada esta fase utilizou-se um método de vetorização automática para, na sequência, exportar estas formas em arquivos de intercâmbio de modelos CAD (*Computer Aided Design* – Desenho assistido por computador) para que pudessem ser gerados os desenhos referentes às elevações (fachadas) a serem usados no registro das informações de edificações de cunho cultural, histórico ou artístico, cuja demanda é significativa em termos de Brasil.

A representação gráfica das elevações resultante dos processos de segmentação e extração possui uma estrutura de dados gráficos que contribui sobremaneira ao arquivamento das formas arquitetônicas de edificações em forma de plantas e ou elevações, que poderão vir a compor um Sistema de Informação ou servir de fonte de informação ao sistema de Cadastro Territorial Multifinalitário, ou então de base para procedimentos de intervenção.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é desenvolver e implementar uma metodologia capaz de detectar e extrair automaticamente os contornos de formas arquitetônicas planas de edificações, utilizando dados provenientes de Laser Escaner Terrestre, com em vistas à automação do processo de intervenção em fachadas de edificações históricas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Obter nuvens de pontos de edificações históricas;
- b) filtrar a nuvem de pontos obtida por varredura Laser;
- c) identificar os diversos planos existentes nas fachadas arquitetônicas utilizando o algoritmo RANSAC;
- d) identificar os contornos das formas arquitetônicas presentes nas fachadas utilizando a triangulação de Delaunay;
- e) reconstruir vetorialmente as formas arquitetônicas das fachadas;
- f) comparar o método proposto com outros métodos de levantamento de maior qualidade cartográfica;
- g) avaliar a qualidade da metodologia desenvolvida por meios comparativos (testes estatísticos).

1.2 MOTIVAÇÃO

A evolução tecnológica computacional ocorrida a partir dos anos 90 vem motivando a reconstrução tridimensional de objetos, produzindo informações relevantes no que concerne à avaliação, reconstrução, cadastramento e preservação de monumentos históricos da memória nacional. Hoje em dia o

sistema Laser Escaner Terrestre vem sendo usado para a captura de informações tridimensionais de superfícies naturais e artificiais realizadas pelo homem (construções). Isto pode ser observado nos trabalhos realizados por Boehler *et al.* (2001), Goktepe *et al.* (2009), Mustafa; Ambar (2009).

A aquisição de dados por varredura Laser Escaner Terrestre vem crescendo, gerando bancos de dados com informações relevantes das formas arquitetônicas contidas em edificações históricas. Neste contexto, a extração de informação vem motivando pesquisas para a solução de problemas tais como: esforço computacional, automação da extração destas informações necessárias para a modelagem das características geométricas de edificações quando se pretende extrair formas arquitetônicas que obedecem a uma determinada geometria, como exemplo um plano, um cilindro, entre outras. (PU; VOSSELMAN, 2006; KARASAKA *et al.*, 2009; BOULAASSAL *et al.*, 2009)

Vale ressaltar que os dados obtidos por varredura a LET são afetados por ruídos. Assim, o processo de extração começa pela escolha de um estimador robusto para a determinação das entidades a serem segmentadas. Uma das razões para a segmentação da nuvem de pontos proposta neste trabalho é a possibilidade de extrair as características geométricas das fachadas que as representam de uma forma eficaz o que de certa forma contribui para o conhecimento dos monumentos históricos.

O método proposto é baseado no algoritmo de RANSAC (**RAN**don **SA**mple **C**onsensus) o qual permite extrair as formas arquitetônicas na segmentação a partir de dados adquiridos através de LET. Neste sentido, a potencialidade da segmentação é um avanço tecnológico sem precedentes em trabalhos com dados Laser, embora a aplicabilidade desta metodologia, em nível de usuários no Brasil ainda seja restrita. Assim sendo, este trabalho pretende contribuir para a inserção desta nova tecnologia no quadro da segmentação e extração semi-automática das formas arquitetônicas planas com vistas à preservação de monumentos históricos.

A aplicação do algoritmo de RANSAC é usada para estimar os parâmetros de um modelo matemático a partir de medições frequentemente afetadas por ruídos (*outliers*). Esta principal característica do algoritmo torna-o particularmente atraente para o processamento de dados proveniente do LET, ou seja, para a sua segmentação. Por outro lado, o algoritmo de RANSAC pode ser usado para a

segmentação com o intuito de extrair as primitivas geométricas cujos modelos matemáticos são conhecidos, tais como: planos, esferas e cilindros.

A homogeneidade relativa dos segmentos é uma propriedade intrínseca à definição da operação de segmentação. Como as fachadas são compostas principalmente de superfícies planas, a coplanaridade dos pontos poderia ser um dos critérios de homogeneidade para segmentar as fachadas de edifícios em um conjunto de segmentos. Este critério de homogeneidade afeta um atributo adicional para os segmentos de interesse, ou seja, sua superfície. Portanto, a hipótese deste trabalho pode ser formulada da seguinte forma: os dados das fachadas dos edifícios adquiridos através de um Laser Escaner Terrestre podem ser segmentados em regiões homogêneas planas em termos de coplanaridade dos pontos dentro deles?

Assim, pode-se explicar a hipótese da segmentação de uma nuvem de pontos adquirida por LET em segmentos planos da seguinte maneira:

- os pontos de cada plano segmentado devem atender à propriedade de coplanaridade;
- cada segmento plano deve representar um conjunto de pontos que constitui uma entidade geométrica, a qual representa uma superfície plana que descreve um detalhe arquitetônico da fachada em análise;
- os planos segmentados são disjuntos, dois a dois, isto quer dizer que a interseção é vazia, significa que um ponto só pode pertencer a um único plano segmentado.

Um ponto muito importante nesta proposta é a utilização de uma metodologia que venha a extrair as informações contidas nas fachadas de maneira automática, minimizando o tempo de trabalho gasto com a extração das formas arquitetônicas de edificações, quando comparados com os métodos tradicionais.

É no aspecto fundamental da segmentação e extração das feições de monumentos históricos que este trabalho se desenvolve. Portanto, através deste trabalho busca-se avançar no sentido de introduzir os levantamentos realizados com LET na documentação e cadastramento de monumentos históricos, além de se ter a possibilidade de gerar um banco de dados tridimensional destas edificações.

Deve-se ter em conta que, atualmente a utilização do Laser Escaner Terrestre nos levantamentos das formas arquitetônicas é uma tendência mundial. No Brasil não deveria ser diferente. Assim este é um dos primeiros trabalhos a serem realizados no país, quer dizer, utilizando dados provenientes de LET e algoritmos conhecidos de pesquisadores nas Ciências Geodésicas permitindo sobremaneira sua assimilação e disseminação.

A principal motivação deste trabalho de pesquisa é a tentativa de reduzir o trabalho exaustivo de vetorização manual das formas arquitetônicas, diminuindo o tempo inerente a este processo.

A questão da automatização de métodos de extração das formas arquitetônicas em dados LET é um desafio, tendo em vista a complexidade dessa tarefa. Portanto, quando se trata da proposição de uma metodologia semi-automática, ela é atualmente, uma justificativa importante para dar continuidade a pesquisas que tenham este tema como objetivo.

Além de o tema ser inovador, não foram encontradas pesquisas que abordem a extração das formas arquitetônicas, usando dados LET. Portanto, esta é outra justificativa importante, pois o presente texto será base para pesquisas futuras, no Brasil.

1.2.1 Contribuição da Tese

Este trabalho contribui com os seguintes aspectos:

- a) proposição do uso do algoritmo de RANSAC, para a segmentação de dados LET;
- b) proposição de um filtro de profundidade baseado na distância equipamento e objeto a ser varrido pelo LET, para a eliminação de dados que não pertencem a fachadas;
- c) proposição da triangulação de *Delaunay* para a identificação dos contornos das formas arquitetônicas das fachadas de edifícios;
- d) extração das formas arquitetônicas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE PESQUISA

Este trabalho é estruturado em seis capítulos, que descrevem todo o estudo realizado na elaboração da metodologia proposta para a extração das formas arquitetônicas de fachadas de edifícios:

- Uma introdução geral sobre a utilização do Laser Escaner Terrestre na extração de formas arquitetônicas, juntamente com os objetivos (geral e específicos) propostos e a motivação da pesquisa, é apresentada neste capítulo primeiro.
- No capítulo segundo discorre-se sobre a documentação de monumentos históricos, os tipos de levantamento que são realizados para este fim e uma revisão sucinta sobre trabalhos nacionais e internacionais nesta área. Também são apresentados os princípios de funcionamento do Laser Escaner Terrestre, sua classificação e características técnicas como também os procedimentos utilizados na segmentação de nuvens de pontos.
- Os materiais utilizados, as fachadas arquitetônicas escolhidas para testar a metodologia proposta, os dados Laser Escaner Terrestre destas fachadas, equipamentos utilizados como Laser Escaner Terrestre e a Estação Total, *softwares*, são apresentados no terceiro capítulo.
- A metodologia proposta é apresentada no quarto capítulo, que contem os procedimentos realizados para a segmentação da nuvem de pontos, a detecção e a extração das superfícies planas, a separação dos planos identificados, a extração das principais formas arquitetônicas das fachadas, a vetorização das mesmas e a sua exportação para softwares de desenho auxiliado por computador.
- Os experimentos e as discussões acerca dos resultados obtidos são apresentados no quinto capítulo.
- Finalmente, no sexto capítulo, é apresentada uma conclusão geral juntamente com as recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos e os principais tópicos de relevância ao desenvolvimento da metodologia proposta no capítulo 4, iniciando com uma breve fundamentação teórica a respeito da documentação de monumentos históricos e de métodos de levantamento de formas arquitetônicas. Na sequência é apresentada a fundamentação teórica mais específica do trabalho que corresponde à extração das formas arquitetônicas a partir de dados Laser Escaner Terrestre: utilização de sistemas de varredura laser na documentação de formas arquitetônicas e segmentação de fachadas a partir da nuvem de pontos.

2.1 DOCUMENTAÇÃO DE MONUMENTOS HISTÓRICOS

O conceito de monumento, bem como a ciência da preservação, tem evoluído e ampliado seu “campo” de interesse, atendendo às necessidades características de cada época. Etimologicamente, a palavra “monumento” vem do verbo latino *monere* que significa “lembrar”, “recordar”. (GROETELAARS, 2004).

A noção de monumentos históricos, de acordo com a Carta de Veneza (1964) compreende uma criação arquitetônica isolada como também um sítio urbano ou rural que dão testemunho de uma civilização particular, de uma evolução significativa ou de um acontecimento histórico.

A princípio, os monumentos eram erigidos com o claro objetivo de referenciar e manter presente para as gerações futuras, fatos e personalidades do passado. Riegl (1982) chama este tipo de monumento, que visa à rememoração celebrativa, de monumento “intencional” e foi durante a Antiguidade e a Idade Média, o único tipo de monumento conhecido.

Diversos documentos sobre a preservação de bens culturais demonstram preocupação e enfatizam a importância da documentação na preservação do patrimônio edificado, ambiental, urbano e paisagístico. As questões relacionadas à preservação do patrimônio, assim como os conceitos do que é o patrimônio e de como preservá-lo, têm sido objeto de estudos e reflexões em vários países do mundo, originando documentos de caráter científico elaborados para conferir

suporte conceitual e difundir a necessidade da preservação de forma mais ampla. (SIMON, 2000).

O primeiro documento sobre esta matéria de que se tem conhecimento, denominado “Carta de Restauo”, de autoria de Camillo Boito, redigida durante o 3º Congresso Italiano de Engenharia e Arquitetura no ano de 1883 em Roma, ressalta a necessidade de descrição e fotografias dos diferentes estágios do trabalho (de restauro), ou seja, de uma documentação que registre as diversas etapas do processo. (BOITO, 2003).

Outros documentos importantes relacionados à preservação e documentação do patrimônio são descritos a seguir:

Carta de Atenas – Outubro de 1931 – Primeiro e consagrado documento internacional que define os princípios gerais da proteção do patrimônio histórico. Entre muitos critérios e conceitos pertinentes ao assunto, a conferência discutiu procedimentos para a salvaguarda dos monumentos isolados dos conjuntos urbanos. Apresentou um item específico sobre a utilidade (e necessidade) da documentação dos monumentos e das cidades:

Cada Estado, ou as instituições criadas ou reconhecidamente competentes para esse trabalho, deve publicar um inventário dos monumentos históricos nacionais, acompanhado de fotografia e de informações; Cada Estado deve constituir arquivos onde serão reunidos todos os documentos relativos aos seus monumentos históricos.

Carta de Veneza – Maio de 1964 – Constitui um dos principais documentos internacionais sobre Conservação e Restauração de Monumentos e Sítios, redigido durante o IIº Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos Monumentos Históricos. Convém citar seu artigo 16º, que recomenda:

... os trabalhos de conservação, de restauração e de escavação serão sempre acompanhados pela elaboração de uma documentação precisa sob a forma de relatórios analíticos e críticos, ilustrados com desenhos e fotografias. Todas as fases dos trabalhos de desobstrução, consolidação, recomposição e integração, bem como os elementos técnicos e formais identificados ao longo dos trabalhos serão ali consignados. Essa documentação será depositada nos arquivos de um órgão público e posta à disposição dos pesquisadores; recomenda-se sua publicação.

Carta de Quito – Novembro/Dezembro de 1967 – Estabelece normas sobre a Conservação e Utilização de Monumentos e Sítios de Interesse Histórico e Artístico:

... a necessidade de conciliar as exigências do progresso urbano com a salvaguarda dos valores ambientais. É hoje uma norma inviolável na formação dos planos diretores a nível local como nacional. Neste sentido todo plano diretor deverá ser realizado de maneira que permita a integrar ao conjunto urbanístico os centros ou complexos históricos de interesse ambiental.

Carta do Restauro – Itália, Abril de 1972 – Estabelece Instruções para os procedimentos de restauro arquitetônicos:

A realização do projeto arquitetônico para a restauração de uma obra arquitetônica deverá ser precedida de um exaustivo estudo sobre o monumento, elaborado de diversos pontos de vista. Parte integrante desse estudo serão as pesquisas bibliográficas, iconográficas e arquivísticas, etc., para obter todos os dados históricos possíveis. O projeto se baseará em uma completa observação gráfica e fotográfica, interpretada também sob o aspecto metrológico, de traçados reguladores e dos sistemas proporcionais e compreenderá um cuidadoso estudo específico para a verificação das condições de estabilidade.

Recomendação de Paris: Proteção do Patrimônio Mundial, Cultural e Natural – Novembro de 1972 – Documento elaborado durante a 17ª Sessão da Conferência Geral da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura - UNESCO. Em seu artigo 5º, do inciso 2º, alínea c, tal documento recomenda “desenvolver os estudos e as pesquisas científicas e técnicas e aperfeiçoar os métodos de intervenção que permitam a um Estado enfrentar os perigos que ameacem seu patrimônio cultural ou natural”; e na alínea d, reforça a necessidade de “adotar as medidas jurídicas, científicas, técnicas, administrativas e financeiras adequadas para a identificação, proteção, conservação, valorização e reabilitação desse patrimônio”.

Declaração de Amsterdã – Outubro de 1975 – Redigida durante o Congresso sobre Patrimônio Arquitetônico Europeu. Desta declaração ressaltamos:

A conservação do patrimônio arquitetônico deve ser considerada não apenas como um problema marginal, mas como objetivo maior do planejamento das áreas urbanas e do planejamento físico-territorial; O planejamento urbano e a organização do território devem integrar as exigências da conservação do patrimônio arquitetônico e não mais a tratar como um elemento secundário.

Recomendação de Nairóbi – Novembro de 1976 - Documento elaborado durante a 19ª Sessão da Conferência Geral da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura - UNESCO.

Um cuidado especial deve ser adotado na regulamentação e no controle das novas construções para assegurar que sua arquitetura se enquadre harmoniosamente nas estruturas espaciais e na ambiência dos conjuntos históricos, sem contudo, copiá-los.

Carta de Washington – Outubro, 1987 – Carta Internacional para a salvaguarda das cidades históricas – ICOMOS recomenda que “Antes de qualquer intervenção, as condições existentes na área deverão ser rigorosamente documentadas”.

Para Neves e Vieira (2000) a preservação consiste da esperança de ainda poder resgatar espaços e bens de valor cultural, significativos para a identidade de um grupo social. Preservar não é parar no tempo, é intervir com sensibilidade nas forças de mudanças, é entender o presente como um produto do passado e um modificador do futuro. Para isto é necessário que se realize uma documentação adequada do patrimônio.

Segundo Lagerqvist (1996) documentar monumentos históricos é um processo cuja finalidade é a descrição detalhada do que se pretende inventariar, produzindo um conjunto de dados do qual se extraíam informações e conhecimento. Para Boehler e Heinz (1999) a documentação do patrimônio serve como ferramenta para tornar as informações a respeito do objeto em estudo, acessíveis a todos e, sobretudo, às pessoas que não puderem ter contato direto com ele, seja por não estar acessível ao interessado, ou porque é grande ou complexo demais. O objeto pode ser visível apenas durante uma pequena parcela de tempo, como no caso das escavações arqueológicas durante obras, ou correr risco iminente de degradação.

Neste sentido, as informações geométricas sobre edifícios existentes, ou até inexistentes, mas de relevância cultural, em plantas ou sob a forma de modelos digitais são relevantes para muitas finalidades, como por exemplo, para o planejamento, a preservação e a reconstrução do patrimônio cultural, ou apenas como documentação histórica. Lastimosamente, muitas construções de valor cultural não contam com a devida documentação, pois as plantas originais foram

perdidas, ou nunca existiram, ou o prédio sofreu inúmeras alterações desde o projeto original, sendo elas não documentadas.

A preservação de construções típicas e prédios públicos com características arquitetônicas representativas de uma comunidade é uma preocupação atual, que esbarra nas limitações econômicas e na falta de políticas de preservação. Uma das estratégias para a eficiente preservação do patrimônio cultural é a documentação das edificações, para apoiar futuras ações de intervenção.

2.2 LEVANTAMENTOS DE FORMAS ARQUITETÔNICAS

O levantamento das formas arquitetônicas de um monumento pode ser entendido como um processo de medição e registro das características do objeto, ou seja, das suas formas visando à geração de uma representação gráfica, gerando assim um cadastro da edificação. Executar o levantamento em si é representar com a maior precisão requerida, todos os elementos mais significativos, os quais são indispensáveis para a caracterização e para o reconhecimento do monumento (DOCCI; MAESTRI, 1987).

O levantamento gráfico de monumentos arquitetônicos é efetuado tradicionalmente, com técnicas simples como o levantamento a trena, *in loco*, onde todos os elementos necessários para sua representação são cuidadosamente medidos. Esta técnica tradicional é utilizada em grande parte dos trabalhos realizados no Brasil, se baseia na medição direta sobre o monumento sendo o desenho normalmente efetuado pela mesma pessoa que efetuou o croqui, não sendo raro o retorno ao campo para complementar ou averiguar medidas imprescindíveis a fim de concluir a representação gráfica do mesmo.

A triangulação é um dos processos mais utilizados neste tipo de levantamento (FIGURA 1). Nele medem-se no mínimo duas diagonais (AD e BC) e duas distâncias (AB e CD) e, sobre estas, as distâncias dos elementos de forma acumulada.

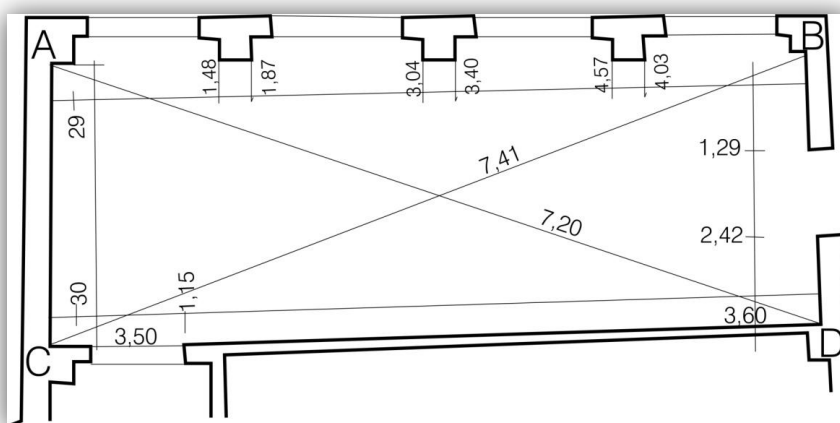


FIGURA 1 - LEVANTAMENTO POR TRIANGULAÇÃO
 FONTE: Groetelaars (2004)

Algumas das dificuldades inerentes a este processo de levantamento tradicional são: a representação de elementos curvos, tamanho do monumento, a representação dos ângulos entre suas arestas e que nem sempre são ângulos retos, dentre outros.

A Topografia, através de teodolitos ou estações totais é também utilizada para auxiliar a medição de algumas formas arquitetônicas, a qual permite medições indiretas e cuja representação se efetua através de coordenadas calculadas analiticamente.

O uso da Fotogrametria em levantamentos arquitetônicos ficou estagnado durante muitos anos. Somente após a 2ª Guerra Mundial, com a finalidade de registro de monumentos históricos e como subsídio a trabalhos de conservação e restauração, é que a Fotogrametria Arquitetônica começou a ser motivada. Hoje, muitos levantamentos arquitetônicos baseiam-se em técnicas fotogramétricas.

O levantamento da Igreja de São Francisco da Penitência no Rio de Janeiro (FIGURA 2) exemplifica o uso da Fotogrametria Terrestre na documentação de edifícios históricos. Este levantamento foi realizado pela empresa Documenta e apresentado no XIX Congresso Brasileiro de Cartografia (BORGES e BORGES, 1999).

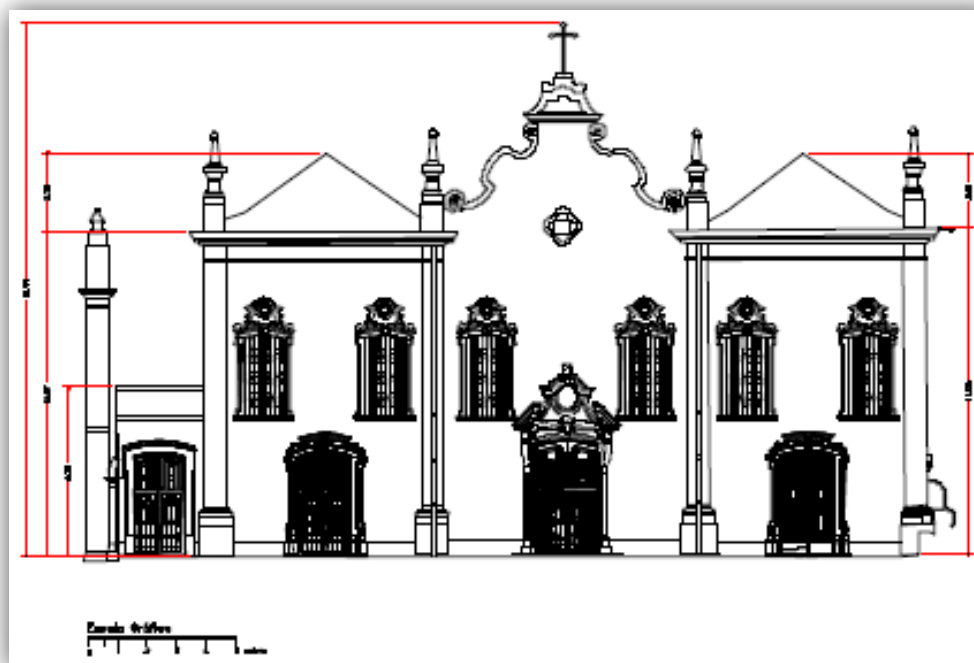


FIGURA 2 - LEVANTAMENTO FOTOGRAMETRICO DA IGREJA DE SÃO FRANCISCO DA PENITÊNCIA – RIO DE JANEIRO – ELEVÇÃO COTADA

FONTE: Borges e Borges (1999)

Os métodos fotogramétricos sofreram grandes transformações desde os primeiros anos de seu desenvolvimento, principalmente com o advento da Fotogrametria Digital, permitindo a simplificação do processo de restituição, antes realizado por pessoas altamente especializadas e por equipamentos de altos custos.

Com relação aos métodos diretos e topográficos, citados anteriormente, quando utilizados em levantamentos de formas arquitetônicas complexas e de grandes dimensões, a Fotogrametria apresenta uma grande vantagem, pois permite a obtenção de um grande número de dados ou medidas, como também uma representação geométrica e gráfica precisa.

Ao final do século XX, diversos fabricantes projetaram e construíram equipamentos de varredura a Laser, cronologicamente surgiram primeiro os aerotransportados e em seguida os terrestres. Estes equipamentos se tornaram essenciais para Engenharia Civil, Naval, Mecânica, Mineração, Arquitetura, Arqueologia, Geografia, Geologia, e como era de se esperar, vêm sendo aplicados também em levantamentos para fins de preservação de patrimônio.

Outro aspecto dos sistemas Laser é que podem ser usados estaticamente ou cinematicamente, instalados sobre carros, helicópteros ou aviões. Este procedimento pode ser combinado com estações totais, Sistema de Posicionamento Global - GPS e outros sensores de atitude. (GLAUS, 2006).

2.3 A UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE VARREDURA LASER NA DOCUMENTAÇÃO DE FORMAS ARQUITETÔNICAS

Várias pesquisas que tratam da modelagem de telhados de edifícios a partir de dados provenientes de Laser Aerotransportado (LIDAR) vêm sendo realizadas nos dias de hoje, dentre as quais podemos citar dois trabalhos que foram desenvolvidos dentro do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, o primeiro consistiu na extração de contornos de edificações (telhados) a partir da integração de imagens de câmara de pequeno porte com dados de Varredura Laser Aerotransportado (MACHADO, 2006) e, o segundo na reconstrução de modelos tridimensionais de edificações, de maneira semi-automática, combinando dados de Laser Aerotransportado com dados espectrais de imagens de satélites de alta resolução espacial (BOTELHO, 2007).

No entanto, poucas publicações tratam da modelagem específica de fachadas de edifícios a partir de dados de Laser Escaner Terrestre. Como foi mencionado anteriormente, isto provavelmente se deve ao aparecimento de ordem cronológica dos dois tipos de Laser. Outro fator que pode ser mencionada é que o mapeamento de uma cidade predomina sobre o mapeamento das fachadas, ou seja, os trabalhos se concentram na detecção dos telhados dos edifícios (pequena escala ou escala cadastral) prioritariamente aos detalhes das fachadas (grande escala ou escala de projeto).

Mesmo assim, a modelagem de fachadas a partir de dados oriundos de equipamentos Laser Escaner Terrestre está atraindo mais e mais pesquisadores em todo o mundo. O trabalho realizado por Briese e Pfeifer (2008), por exemplo, onde os autores propõem uma abordagem de modelagem baseada principalmente na detecção de características lineares de dados de LET. A pesquisa é dividida em duas etapas: numa primeira fase as características lineares são detectadas

automaticamente e, numa segunda etapa, estas linhas são reconstruídas de maneira semi-automática gerando como produto final uma representação vetorial das formas arquitetônicas da fachada.

Outro trabalho, publicado por Belton e Lichti (2006), que segue a linha da utilização de dados Laser Escaner Terrestre em levantamentos arquitetônicos, consiste em classificar os pontos que definem as características das fachadas através de uma análise estatística pelo cálculo da matriz variância-covariância. Em seguida são determinados os autovetores da matriz variância-covariância para determinar a orientação de cada ponto. Com base nessas orientações os autores são capazes de ordenar os pontos em três classes: pontos de fronteiras, os quais são definidos pela interseção de duas ou mais superfícies; pontos de bordas das superfícies internas; e pontos de superfícies.

Böhm *et al.* (2007) também combinaram dados de Laser Escaner Terrestre e imagens fotográficas para aperfeiçoar os modelos grosseiros extraídos a partir de dados Laser Aerotransportados. Uma vez gerados estes modelos a partir de dados Laser Aerotransportados, os dados do LET, juntamente com imagens fotográficas das fachadas, são utilizados para refinar o modelo gerado pelo Laser Aerotransportado, determinando os contornos das fachadas e das portas e janelas que são detectados e classificados como bordas horizontais e verticais. Finalmente o modelo é construído através da combinação do modelo grosseiro extraído dos dados Laser Aerotransportado e os elementos extraídos dos dados LET e fotografias.

No mesmo contexto Deveau (2006) propuseram uma estratégia para a modelagem de fachadas arquitetônicas a partir da nuvem de pontos gerada pelo Laser Escaner Terrestre e imagens fotográficas. Esta estratégia começa com a orientação das imagens, apoiada pelas nuvens de pontos, seguida por um estágio de segmentação semi-automática e, finalmente, pela fase de modelagem.

A modelagem de fachadas para a extração de suas linhas não é uma tarefa fácil de ser realizada, quanto mais a sua automação com a produção de resultados qualidade. Neste sentido, para superar essas dificuldades, Pu e Vosselman (2009) propuseram uma abordagem para a modelagem semi-automática de fachadas através da combinação de dados de Laser Escaner Terrestre e imagens fotográficas. Os autores mostram que a adição de dados semânticos facilita a

extração de superfícies planas de fachadas e consequentemente a sua modelagem. Eles realizaram a extração dos contornos a partir das imagens e usaram estes resultados para melhorar as bordas extraídas da nuvem de pontos.

No Brasil, Centeno *et al.* (2004) realizaram um levantamento do Teatro Paiol, na cidade de Curitiba, através de Fotogrametria Terrestre realizando uma restituição fotogramétrica monocular com o software *Photomodeler*, utilizando fotografias obtidas de uma câmera acoplada ao Laser Escaner Terrestre modelo ILRIS 3D da Optech, para gerar um modelo tridimensional da edificação (FIGURA 3), comparando as duas metodologias e mostrando as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

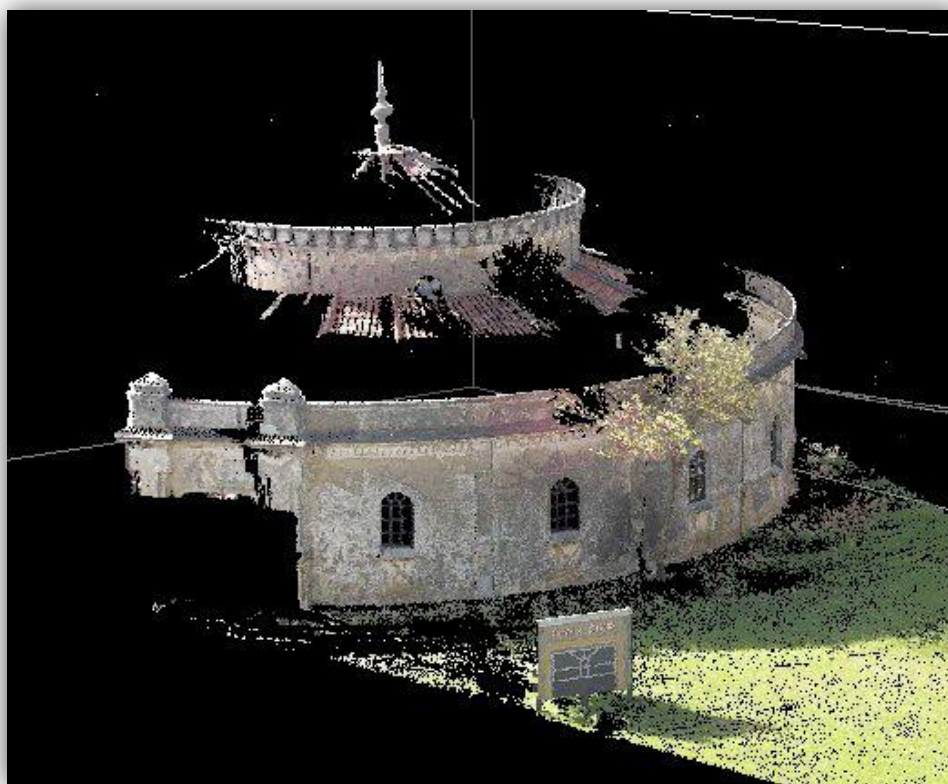


FIGURA 3 - LEVANTAMENTO LASER DO TEATRO PAIOL - CURITIBA - PR
FONTE: Centeno *et al.* (2004)

Os autores apresentam como vantagens da Fotogrametria a rapidez na tomadas das fotografias e obtenção texturização do produto final. Com relação ao levantamento por Laser Escaner Terrestre apresentam como vantagens a quantidade de pontos obtidos e a exatidão da varredura a Laser que se torna mais eficiente, principalmente em superfícies curvas como é caso do Teatro Paiol.

Amorim e Chudak (2005) dentro do projeto de preservação de monumentos históricos da Bahia, realizaram um levantamento no Centro Histórico de Salvador, no Pelourinho, com o objetivo de introduzir a utilização de novas tecnologias para a documentação em áreas históricas na Bahia. No levantamento foi usado um Laser Escaner Terrestre modelo HDS – 2500 da Leica para a coleta dos dados e o *software* Cyclone para a visualização dos dados coletados. Após o levantamento, como resultado foi apresentada a fachada digitalizada, sobre a nuvem de pontos, da igreja de São Francisco (FIGURA 4), verificando a potencialidade do uso de LET para o registro de informações de monumentos históricos.



FIGURA 4 - LEVANTAMENTO LASER DA IGREJA DE
SÃO FRANCISCO - SALVADOR - BA
FONTE: Amorim e Chudak (2005)

Veiga (2008) realizou um levantamento por varredura a Laser Escaner Terrestre, junto com um levantamento fotográfico, no Espaço Cultural da Av. Bernardo Monteiro, em Belo Horizonte - MG, para provar a eficiência da aplicação destas tecnologias no mapeamento urbanístico e arquitetônico de edificações patrimoniais e de espaços culturais (FIGURA 5). Os resultados apresentados são as medidas de larguras e alturas de feições, tais como árvores e calçadas.

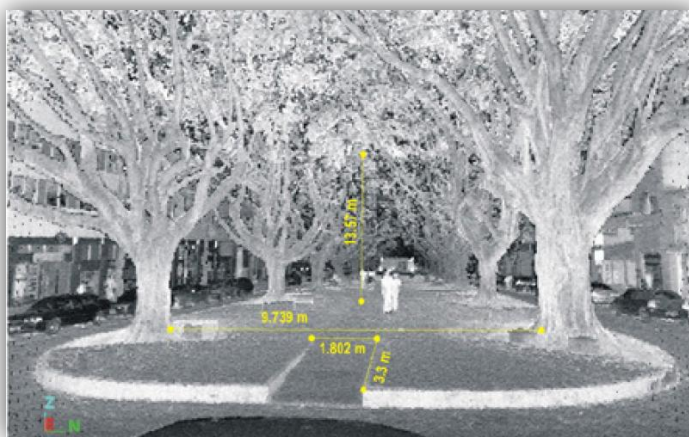


FIGURA 5 - LEVANTAMENTO LASER DA AV. BERNARDO MONTEIRO BELO HORIZONTE – MG.
FONTE: Veiga (2008)

Silva (2010) executou um levantamento por Fotogrametria Terrestre no Paço Municipal, localizado na Praça Generoso Marques, na cidade de Curitiba - PR, nos anos de 2000/2001. Em 2010, realizou um novo trabalho no Paço Municipal, agora com Laser Escaner Terrestre, o qual ficou limitado à fachada principal, já que o intuito deste segundo levantamento era comparar os dados obtidos de forma distinta (Fotogrametria x LET), como também o tempo de preparação e obtenção dos dados (FIGURA 6). Com o resultado desta comparação chegou-se à conclusão de que o tempo de aquisição de dados por LET é de cinco vezes menor do que por Fotogrametria Terrestre; de que não há necessidade de iluminação; e que a quantidade de pontos levantados ficou em aproximadamente 250 milhões após a filtragem das nuvens e unificadas as várias nuvens de pontos.

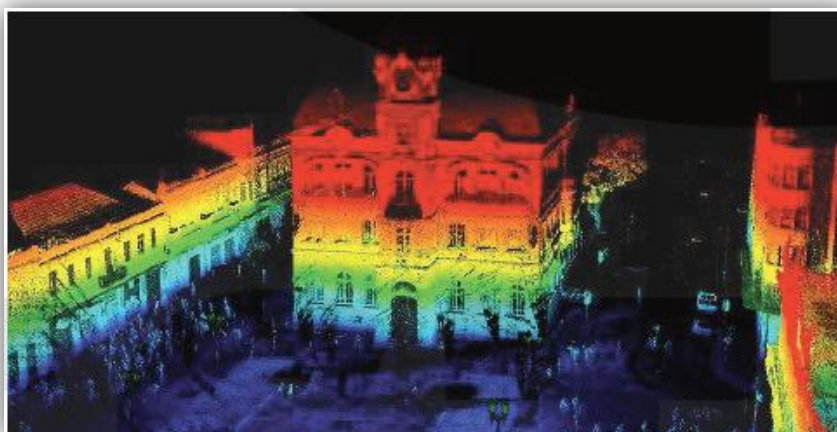


FIGURA 6 - LEVANTAMENTO LASER DO PAÇO MUNICIPAL CURITIBA - PR
FONTE: Silva (2010)

Koatz e Segre (2010) realizaram um levantamento do Paço Imperial da Praça XV, na cidade do Rio de Janeiro - RJ, empregando Fotogrametria Terrestre e digitalização por Laser Escaner Terrestre, com o intuito de documentar e obter informações sobre as características do objeto em estudo (FIGURA 7). Os resultados apresentados mostram a viabilidades e vantagens do levantamento realizado com LET comparados com a Fotogrametria terrestre. Contudo, os autores observaram que ambos os métodos são complementares, sobretudo quando informações de cor e textura do objeto são fundamentais.

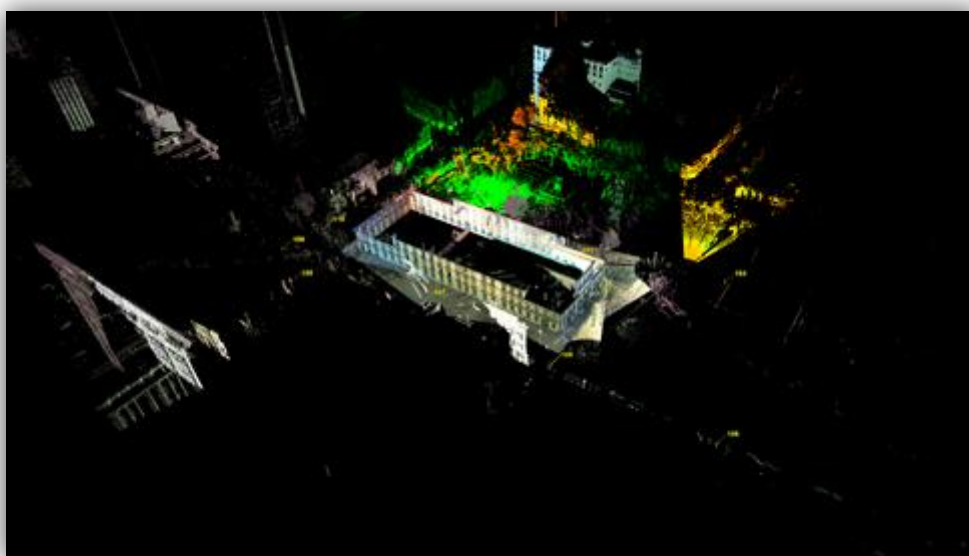


FIGURA 7 - LEVANTAMENTO LASER DO PAÇO IMPERIAL PRAÇA XV - RIO DE JANEIRO
FONTE: Koatz e Segre (2010)

Com base nestas pesquisas, verifica-se que os dados oriundos de um levantamento por LET oferecem um grande potencial para a coleta de informações a respeito da geometria dos objetos nas superfícies das fachadas de monumentos históricos, mas também é constatado que, no Brasil, as pesquisas estão centradas na aquisição dos dados e na comparação dos mesmos com outras técnicas, bem como, na utilização conjunta de dados e ou resultados. Diferentemente das pesquisas que estão sendo realizadas no exterior, onde, além da comparação, as pesquisas estão interessadas na extração, seja manual ou automática das características geométricas das formas arquitetônicas que compõem as fachadas e é neste caminho que este trabalho de pesquisa foi conduzido, ou seja, na extração das formas arquitetônicas nas fachadas de edifícios.

2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LASER ESCANER TERRESTRE

A varredura do Laser Escaner Terrestre é uma nova tecnologia utilizada na Geomática para a aquisição de dados espaciais. Não somente por sua rápida aquisição de dados espaciais com uma densidade de pontos muito grande, como também pela não necessidade de contato direto com o objeto. Os dados fornecidos por equipamentos LET, sejam em modo estático ou cinemático, tornam-se adequados para questões de modelagem tridimensional ou para a extração de feições de fachadas arquitetônicas.

Segundo Ingensand *et al.* (2003) as áreas de aplicação do Laser Escaner Terrestre são muitas, entre as quais podemos citar: a conservação e restauração do patrimônio arquitetônico e arqueológico; a visualização 3D; modelagem de equipamentos industriais; aplicações florestais, realidade virtual e aumentada; dentre outros. O “entusiasmo” pela utilização do Laser Escaner Terrestre é essencialmente pela rápida aquisição da informação sem o contato direto com o objeto, o que representa uma vantagem sobre as outras técnicas, principalmente em zonas de difícil acesso ou zonas de acesso restrito ou perigosas.

Do ponto de vista econômico, o custo de um equipamento Laser Escaner Terrestre, é relativamente baixo, se observamos a quantidade de dados adquiridos em um tempo relativamente reduzido. Isto não só permite um ganho de tempo, como também evita um retorno ao campo para complementar parte do levantamento que não foi realizado, como ocorre com outras técnicas de aquisição de dados.

Com relação aos produtos, a nuvem de pontos fornecida pelo Laser Escaner Terrestre pode servir para gerar vários tipos de produtos tais como: perfis, cortes, modelos numéricos de terreno, modelos numéricos de superfícies. (SHULZ e INGENSAND, 2004).

Assim, o objetivo deste capítulo é descrever sucintamente os elementos fundamentais da varredura do Laser Escaner Terrestre e os principais sistemas presentes no mercado, para uma melhor compreensão dos mesmos.

2.4.1 Princípio da Varredura a Laser

Equipamentos Laser Escaner Terrestre estáticos permitem a aquisição de uma malha de pontos com coordenadas tridimensionais a partir de uma posição terrestre fixa (PFEIFER, 2007). O LET usa um feixe óptico de alta potência, com baixa divergência, para determinar a distância entre o sensor e a superfície dos objetos. A faixa do espectro a ser utilizada é condicionada por questões de segurança, pois devido à alta potência da energia utilizada, o feixe pode ser nocivo para os olhos humanos. O sistema de varredura Laser pode ser dividido em três componentes principais: a unidade de medição Laser propriamente dita, encarregada de emitir e receber o sinal Laser; um sistema de varredura óptico-mecânico; e uma unidade de registro de medições de apoio (BALTSAVIAS, 1999).

Os Lasers emitem um feixe de alta frequência permitindo a aquisição de milhões de pontos em um curto espaço de tempo, o deslocamento do raio Laser é medido com precisão o que permite um posicionamento preciso de todos os pontos do objeto que está sendo varrido. As medidas dos ângulos horizontais, verticais e da distância inclinada são efetuadas respectivamente utilizando codificadores angulares e um distanciômetro (FIGURA 8).

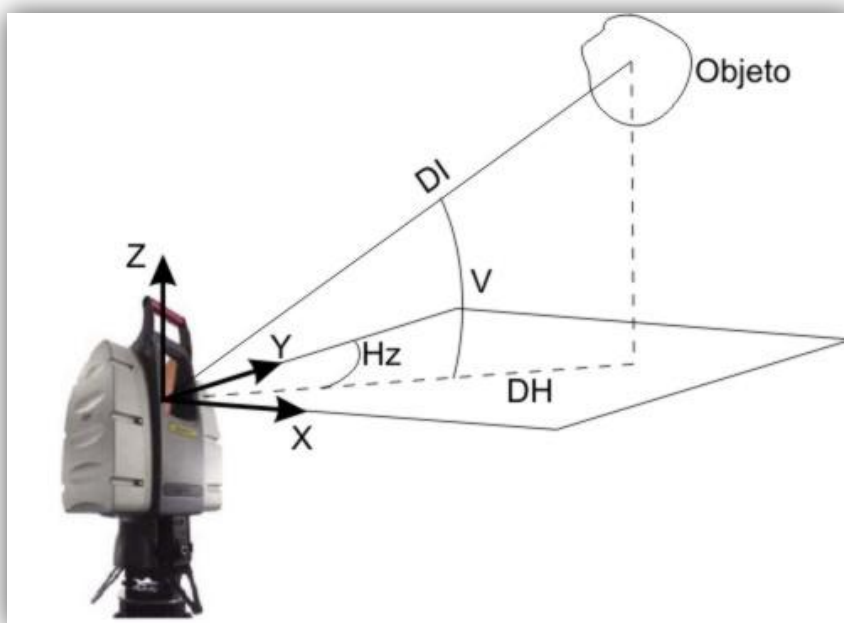


FIGURA 8 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DAS COORDENADAS 3D DE UM PONTO

FONTE: Adaptada de Boulaassal *et al*, (2009).

Além das coordenadas (X, Y, Z), de cada ponto atingido pelo feixe Laser, a intensidade do sinal de retorno é captada pelo sensor que é também registrada e armazenada e se uma câmera fotográfica for acoplada ao equipamento, cada pulso Laser pode ser associado a valores numéricos de vermelho, verde e azul (Red, Green, Blue).

As coordenadas (X, Y, Z), dos pontos sobre o objeto estão referenciadas ao centro do equipamento, o qual é definido pela interseção do eixo principal e do seu eixo secundário. Estas coordenadas são função dos parâmetros medidos conforme a equação 2.1 (BOULAASSAL *et al.* 2009).

$$\begin{cases} X = DI * \cos V * \sin Hz \\ Y = DI * \cos V * \cos Hz \\ Z = DI * \sin V \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

DI: é a distância inclinada entre o escaner e o objeto;

V: é o ângulo vertical;

Hz: é o ângulo horizontal.

2.4.2 Classificação dos Lasers Escaner Terrestres

Os sistemas Laser Escaner Terrestre podem ser classificados em: dinâmicos – aqueles que são transportados sejam por aviões, helicópteros e/ou automóveis; e os estáticos – que são classificados segundo três grandes grupos, de acordo com o princípio de seu funcionamento: os que trabalham com o princípio de tempo de voo; os baseados em métodos de medida da diferença de fase; e os baseados no princípio da triangulação (SCHOFIELD e BREACH, 2007).

2.4.2.1 Laser Escaner de tempo de voo

Os LASERS Escaner Terrestres são equipamentos com medidores de distâncias, que normalmente empregam os componentes ilustrados na (FIGURA 9), tais como, um transmissor LASER, um receptor LASER, um relógio para medir o tempo e um transmissor e receptor óptico.

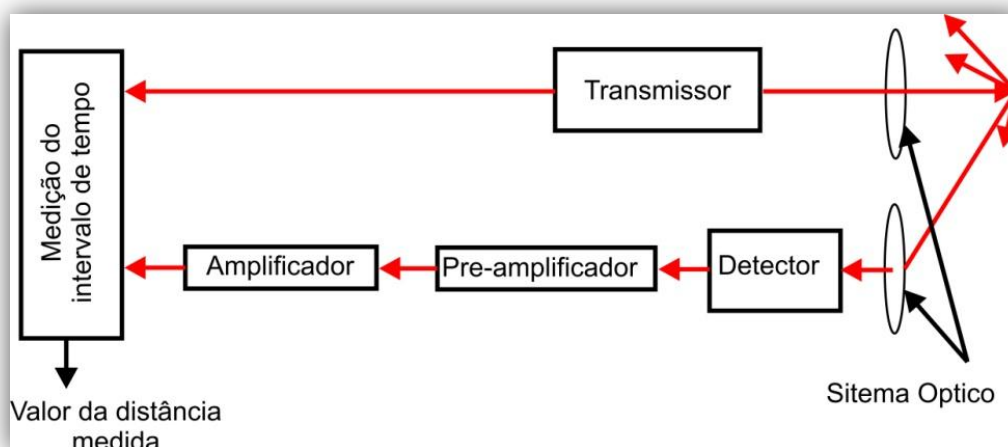


FIGURA 9 - COMPONENTES DO DISTANCIÔMETRO DOS ESCANERS DE TEMPO DE VOO

FONTE: Adaptada de Schan e Toth (2009)

Segundo Schofield e Breach (2007) no princípio de *tempo de voo*, um curto e intenso pulso de radiação é emitido pelo transmissor ao refletor, que reflete um sinal paralelo até o receptor. Assim, a distância é calculada pelo tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal, o qual é multiplicado pela velocidade da luz (FIGURA 10).

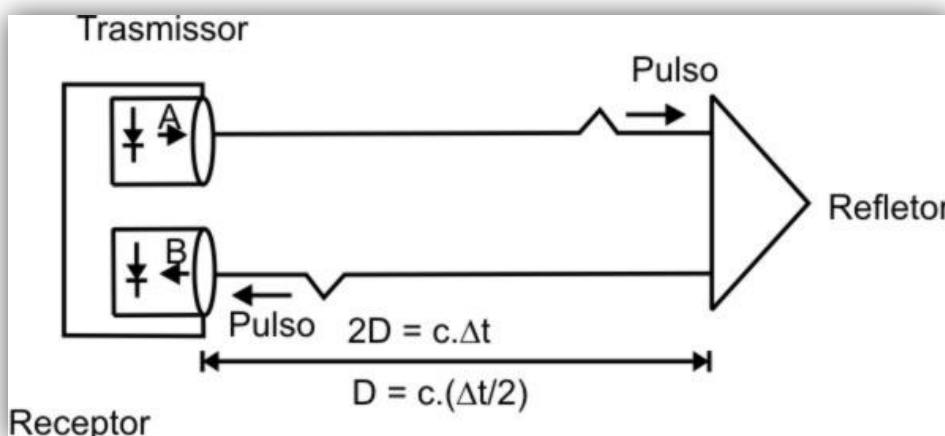


FIGURA 10 - PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE TEMPO DE VOO

FONTE: Adaptada de Schofield e Breach (2007)

Da figura 9 é possível observar que a distância entre o Laser e o alvo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$D = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2.2)$$

onde:

t : tempo de propagação da onda entre o transmissor e o receptor;

c : velocidade da luz no vácuo;

D : distância entre o Laser e o alvo.

O instrumento registra o tempo, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao referencial do Laser. A partir destes dados é possível calcular a distância e depois as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos, em relação ao sensor. A intensidade pode ser usada para gerar uma imagem associada à refletância da superfície do objeto varrido, no comprimento de onda utilizado. (TOMMASELLI, 2003).

A partir da equação (2.2) e considerando a velocidade da luz constante, pode-se dizer que a medida da distância depende da resolução da medida do tempo. Em outras palavras, a capacidade de medir pequenos intervalos de distâncias é diretamente dependente da medida de pequenos intervalos de tempo. (BALTSAVIAS, 1999).

$$\Delta D = c \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2.3)$$

onde:

Δt : variação do tempo medido;

c : velocidade da luz;

ΔD : variação da distância medida.

Assim, a precisão da medida da distância é fortemente dependente da medida do tempo, o que acarreta um grande inconveniente no Laser Escaner Terrestre que emprega o tempo de voo. Por exemplo, se, deseja-se medir pontos com espaçamentos de um milímetro é preciso ter relógios que meçam o tempo com precisão de 6,7 pico segundos (ps), pois:

$$t = \frac{2D}{v} = \frac{2 \times 10^{-3}}{3 \times 10^8} = 6,7 \text{ ps} \quad (2.4)$$

O sistema de tempo de voo (FIGURA 11) é recomendado para trabalhos a serem executados nas faixas de médio e longo alcance (SHULZ e INGENSAND, 2004). Na sequência são mostrados dois modelos de equipamentos Laser Escaner Terrestre (FIGURA 12) baseados no princípio de tempo de voo (à esquerda o HDS – 3000 da Leica e a direita o LMS -390i da Riegl). Estes dois equipamentos LET foram os utilizados no desenvolvimento da tese.

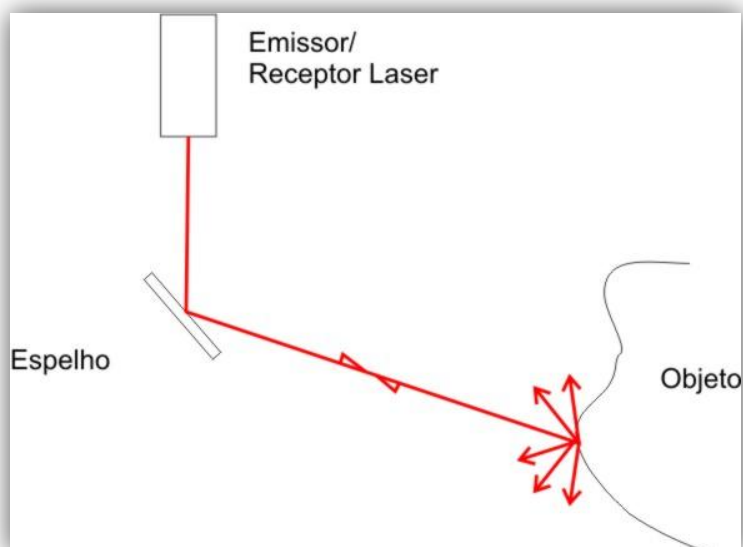


FIGURA 11 - ESQUEMA DE UM ESCANER DO TIPO TEMPO DE VOO

FONTE: Adaptada de Boehler e Marbs (2002)



HDS – 3000



RIEGL – Z390i

FIGURA 12 - MODELOS DE ESCANER DE TEMPO DE VOO
 FONTE: www.cyra.com; www.riegl.com

2.4.2.2 Laser Escaner de medida da diferença de fase

Os sistemas Laser Escaner Terrestre baseados no método da medida de diferença de fase usam ondas do espectro infravermelho, luz visível ou microondas para a medição da distância. A diferença de fase, entre os sinais transmitidos e refletidos, da parte fracionada do comprimento é menor que o valor da parte inteira do comprimento da onda modulada (FIGURA 13).

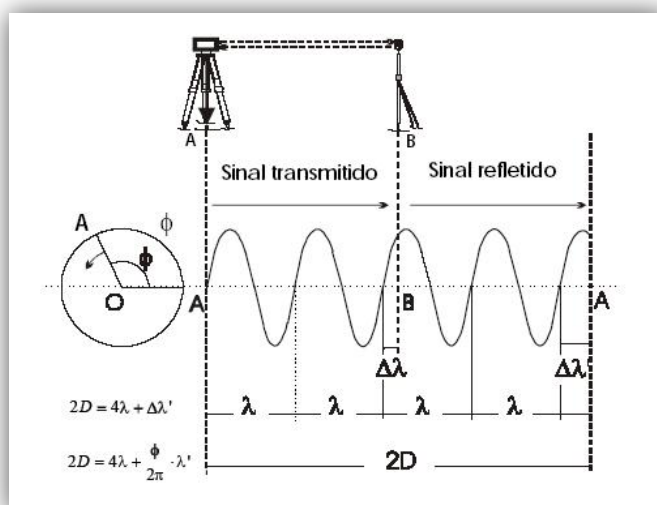


FIGURA 13 - ESQUEMA DO MÉTODO DA
 DIFERENÇA DE FASE
 FONTE: Adaptada de Kennie; Petrie (1993)

Como o sinal é refletido de volta ao transmissor, ou seja, ao Laser, a distância entre os pontos é dada por:

$$2D = N\lambda + \Delta\lambda' \quad (2.5)$$

onde:

N: é o número inteiro de revoluções do vetor AO, neste caso 4;

$\Delta\lambda'$: é a parte fracionária dada pelo ângulo de fase.

Na figura 13 pode-se observar que $\Delta\lambda' = \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda$; substituindo esta expressão na equação 2.5, obtém-se (MAILLET, 1984):

$$2D = N\lambda + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \lambda \quad (2.6)$$

$$D = N \frac{\lambda}{2} + \frac{\phi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.7)$$

O problema agora é a determinação do número inteiro de N, necessário para encontrar a distância D , isto é, a “resolução da ambiguidade”. Na determinação da ambiguidade existem vários métodos, tais como o uso de frequências de modulação diferentes ou envio de um grande número de frequências próximas sucessivas para a determinação de N . Na sequência são apresentados dois exemplos de Laser Escaner Terrestre que utilizam a diferença de fase para a determinação da distância, a direita é mostrado o modelo HDS – 4500 da Leica e a esquerda o modelo IMAGER – 5003 da Zoller e Frölich (FIGURA 14). Equipamentos deste tipo são adequados para medições de médias e curtas distâncias (distância inferior a 100 m) e para coletar uma maior quantidade de pontos em menor espaço de tempo.



a) HDS – 4500



b) Imager – 5003

FIGURA 14 - LASER ESCANER DE DIFERENÇA DE FASE

a) LEICA HDS - 4500 e b) IMAGER - 5003.

FONTE: www.cyra.com; www.zofre.de

2.4.2.3 Laser Escaner de triangulação

No princípio da triangulação, um pulso Laser é emitido pelo sistema e a luz que é refletida pelo objeto é registrada por uma matriz de sensores CCD (*Charge-Coupled Device*). O sensor transforma a luz refletida em sinais elétricos e estes são convertidos em bits através de um conversor analógico digital.

Assim, o ângulo de varredura é registrado no sistema Laser Escaner Terrestre de triangulação cada vez que um pulso é emitido. Conhecendo-se a base entre o espelho do sensor Laser e a câmara, através de um processo de calibração, determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto (FIGURA 15).

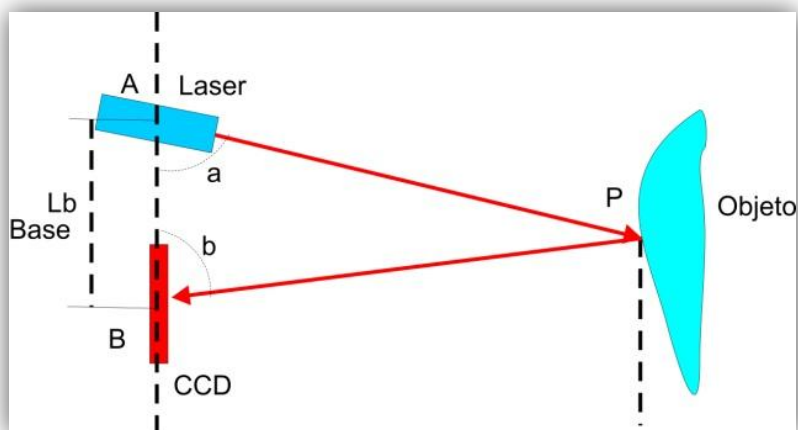


FIGURA 15 -ESQUEMA DE UM ESCANER DE TRIANGULAÇÃO

FONTE: Adaptado de Boehler e Marbs (2002)

Como a geometria entre o Laser e o sensor *charge-coupled device* - CCD é conhecida, isto permite o cálculo das coordenadas tridimensionais dos pontos que são iluminados pelo feixe Laser usando conceitos da intersecção fotogramétrica. A medida da distância D_{AP} é determinada usando os dois ângulos de deflexão a e b através da seguinte relação (MAILLET, 1984):

$$D_{AP} = Lb * \frac{\text{sen}(b)}{\text{sen}(a + b)} \quad (2.8)$$

onde:

D_{AP} : distância inclinada entre o Laser e o ponto P situado sobre a superfície do objeto;

Lb : comprimento da base;

a : ângulo entre o raio Laser emitido e o eixo vertical;

b : ângulo entre o raio Laser refletido e o eixo vertical.

Os LET que utilizam este tipo de princípio normalmente são empregados para distâncias curtas, por que a precisão decai proporcionalmente como o aumento da distância do equipamento ao objeto. Os equipamentos LET de triangulação são destinados principalmente para medições de curta distância - até 40 m, como por exemplo, o equipamento LET Soisic da Mensi. Dois exemplos de equipamentos LET que utilizam o princípio da triangulação para a captura de dados (FIGURA 16) são mostrados a seguir: o modelo Minolta Vivid – 910 da Konica Minolta à direita e o modelo Callidus CT – 180 da Callidus à esquerda.

A (TABELA 1) apresenta uma comparação das diferentes tecnologias de Laser Escaner Terrestre apresentadas. Esta tabela está baseada nos trabalhos realizados pelo i3 Mainz - Institut für Raumbezogene informations und Messteschnik, Johannes Gutenberg Universität em 2004.



a) Minolta vivid – 910



b) Callidus CT – 180

FIGURA 16 - LASER ESCANER DE TRIANGULAÇÃO

a) MINOLTA VIVID – 910 b) CALLIDUS CT - 180

FONTE: www.minoltausa.com; www.callidus.de acesso 10/2009

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES TIPOS DE LASER ESCANER TERRESTRE

Tipos de LST	Precisão da distância	Alcance (em m)	Velocidade de aquisição	Utilização
Escaners de triangulação	1 mm a 1 m	1 a 50	100 a 500 pontos/seg.	Pequenas peças
Escaners de tempo de voo	7 mm a 50 m 1cm a 100 m	1 a 1200	100 a 7.000 pontos/seg.	Trabalhos topográficos (grandes distâncias)
Escaners de diferença de fase	6 mm a 50 m 1 cm a 100 m	1 a 80	100.000 a 500.000 pontos/seg.	Trabalhos topográficos (pequenas distâncias)

Fonte: Adaptado de Boehler *et al*, (2004).

2.4.3 Características técnicas dos Lasers Escaner Terrestres

2.4.3.1 Acurácia dos Lasers Escaners

As especificações contidas nos catálogos dos fabricantes de Laser Escaner Terrestre informam as acurácias de seus equipamentos (BOEHLER *et al.*, 2004), mas experiências têm mostrado que isto às vezes não é verdadeiro. Mesmo que estes sejam produzidos em pequena escala, as acurácias variam de instrumento para instrumento, além dos cuidados que às vezes não são levados em conta quando do manuseio destes instrumentos (BOEHLER e MARBS 2002).

Cada nuvem de ponto que é gerada pelo Laser Escaner contém uma quantidade de pontos com ruídos. Assim, se apenas a nuvem de pontos, sem tratamento algum, é entregue como resultado final de um levantamento, isto não garante a qualidade final deste levantamento, devido à presença de erros quando comparado com outros tipos de levantamentos. Vários autores tais como Lichti *et al.* (2002), Balzani *et al.* (2001), Johansson (2002), Kern (2003), Ingensand *et al.* (2003), Schulz (2007) e Kersten *et al.* (2008) têm publicado trabalhos relacionados com a acurácia e com os cuidados que devem ser levados em consideração quando se trabalha com Laser Escaner Terrestre.

2.4.3.2 Acurácia Angular

Segundo Boehler *et al.* (2001) o pulso Laser é direcionado por um sistema de espelhos sincronizados. Dois dispositivos (espelhos e/ou prismas) perpendiculares são utilizados para apontar o feixe para diferentes pontos na superfície do objeto. Com a leitura das duas direções no instante de emissão de um pulso, associando a distância instrumento/objeto, é possível determinar as coordenadas tridimensionais do objeto. Assim, qualquer erro tanto nos eixos mecânicos ou nos dispositivos ópticos resulta em erros de propagação do sinal e conseqüentemente nas coordenadas dos pontos da nuvem (RESHETYUK, 2006; SCHULZ, 2007).

2.4.3.3 Acurácia Linear

A distância é calculada com base no método *tempo de voo* (intervalo de tempo) ou o método de comparação de fase entre o sinal de partida e chegada do pulso Laser. Os erros lineares podem ser observados comparando-se a distância obtida pelo Laser Escaner Terrestre com métodos tradicionais de maior acurácia, como por exemplo, estações totais ou distanciômetros. Na determinação destas distâncias a alvos planos, cilíndricos ou esféricos podem ser utilizados desde que tenham suas posições precisas obtidas com instrumentos e métodos mais acurados que o Laser Escaner Terrestre (BOEHLER *et al.* 2001, LICHTI *et al.* 2002, LICHTI e HARVEY 2002, INGENSAND *et al.* 2003 e SCHULZ, 2007).

Os erros lineares podem ser detectados comparando-se as medidas de distâncias horizontais e verticais entre objetos (alvos), que são colocados a uma mesma distância do Escaner, Essa comparação deve ser feita com as medidas realizadas por métodos de maior acurácia que o Laser a ser testado. Boehler *et al.* (2001) utilizou métodos topográficos na determinação das medidas padrão. Nesta comparação foram usados alvos esféricos, fixados em uma placa metálica e distribuídos sobre uma escada. O Laser foi colocado a diferentes distâncias em relação aos alvos, variando entre 3 e 60 metros (FIGURA 17).

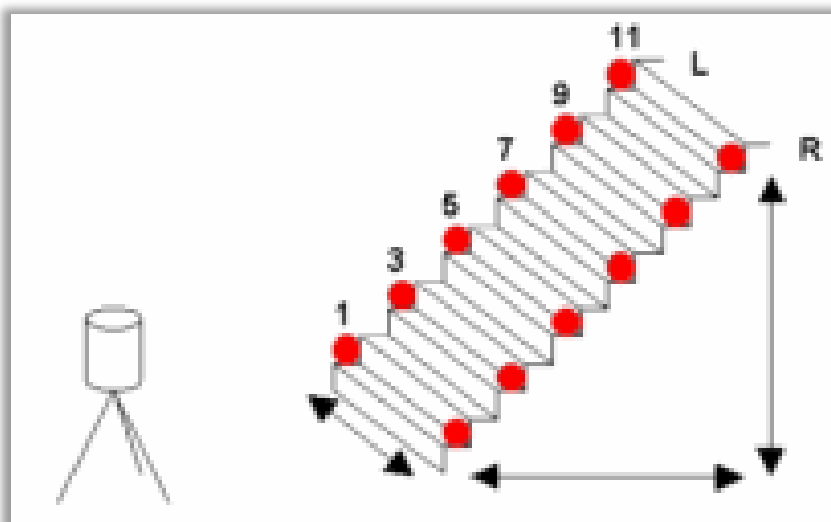


FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DE ALVOS
FONTE: Boehler et al. 2001

2.4.3.4 Resolução espacial e alcance

O termo resolução é usado de diferentes formas quando o desempenho dos sistemas Laser Escaner Terrestre é discutido. Do ponto de vista dos usuários de LET, a resolução está ligada à detecção de pequenos objetos na nuvem de pontos. Tecnicamente, duas especificações do LET contribuem para verificar este desempenho: a possibilidade de realizar pequenos incrementos angulares entre dois pontos sucessivos; e o tamanho do ponto projetado sobre o objeto.

Assim, a combinação, tanto do incremento angular como do tamanho do feixe laser projetado sobre o objeto determinarão a resolução da informação adquirida pelo LET. Uma abordagem prática é confeccionar uma caixa de 300 mm x 300 mm, com ranhuras radiais de 30 mm na parte externa as quais vão diminuindo quando ao se aproximam do centro (FIGURA 18).

Caso a resolução do Laser Escaner seja boa, as reflexões a partir do fundo não só devem estar presentes nas regiões periféricas como também no centro (INGENSAND et al 2003, BOEHLER e MARBS, 2005; SCHULZ, 2007).

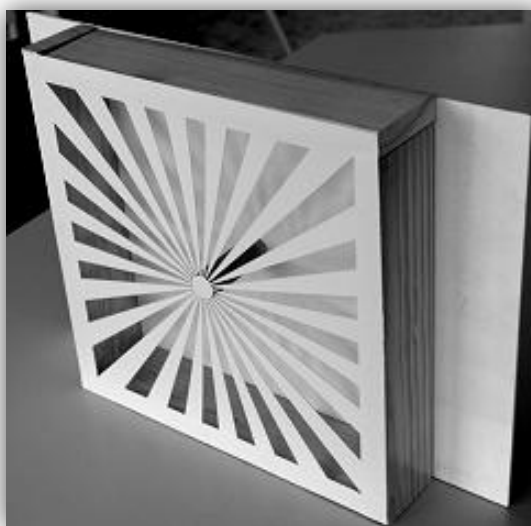


FIGURA 18 - ALVO COM RANHURAS
FONTE: Boehler, e Marbs (2005)

2.4.3.5 Efeitos de borda

A projeção do raio Laser na superfície varrida possui um tamanho que varia conforme o modelo de equipamento utilizado e a distância entre o objeto e o instrumento. Quando essa projeção acerta a borda de um determinado objeto, somente uma parte dele é refletida. O restante, provavelmente se refletirá a partir de outra superfície adjacente, uma superfície diferente, detrás da borda (BOEHLER *et al*, 2001, LICHTI *et al*, 2002 e INGENSAND *et al.*, 2003).

Boehler *et al.* (2001) realizou várias pesquisas para testar o efeito de bordas em diferentes modelos de Laser Escaner Terrestre, utilizando para isto alvos padrão com diferentes tipos de bordas e, assim, comparar o desempenho de diferentes tipos de LET (FIGURA 19).

Como resultado Boehler *et al.* (2001), classificou a qualidade das bordas em três níveis: de alta qualidade – quando a borda é bem definida e fina, com poucos pontos dispersos (parte superior da FIGURA 19); de média qualidade – quando a borda bem definida, porém espessa (parte central da FIGURA 19); e de baixa qualidade – quando a borda não tem forma definida e possui muitos pontos dispersos (parte inferior da FIGURA 19).

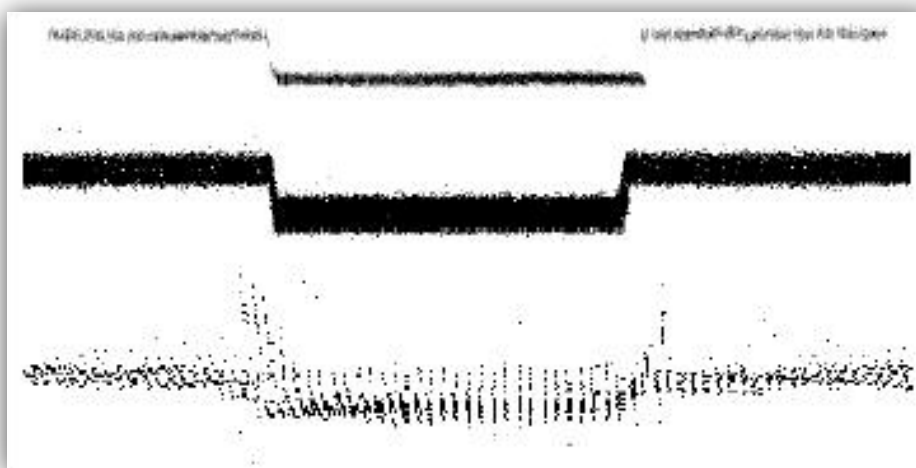


FIGURA 19 - QUALIDADE DAS BORDAS
FONTE: Boehler et al. (2001)

2.4.3.6 Efeitos das condições ambientais

Os efeitos das condições ambientais estão relacionados à temperatura, atmosfera e interferência de radiação. Cada LET irá funcionar perfeitamente quando usado dentro de um intervalo de temperatura. Fora deste intervalo, estudos têm mostrado que pode haver desvios nas medidas, principalmente na medida de distâncias. Tem-se notado que a temperatura interna do LET será muito maior que a temperatura ao seu redor, este aquecimento é provocado quando ele é exposto à radiação solar. Consequentemente, os efeitos provocados pela temperatura apresentam variações sistemáticas aos dados. (BOEHLER *et al.*, 2001; INGENSAND, 2006).

Como em todo medidor óptico de distância, a mudança da velocidade de propagação da luz com relação à mudança de temperatura e pressão pode também ser observado nos sistemas Laser Escaner Terrestre, contudo para pequenas distâncias este efeito pode ser negligenciado. Relatórios de vários usuários que fizeram medidas em locais como muita poeira ou vapor relataram que os efeitos provocados por estas condições são semelhantes aos efeitos provocados pelas bordas. (BOEHLER, 2004, INGENSAND, 2006).

O LET opera em uma faixa de frequência limitada, por esta razão filtros são aplicados na unidade receptora para que somente a frequência do Laser seja recebida. Assim, as radiações vindas de diferentes fontes, tais como luz do Sol ou até de lâmpadas que são mais fortes se comparadas com o sinal do, são suficientemente fortes para passar pelos filtros e assim influenciar na acurácia das medidas ou em algumas medidas. (BOEHLER *et al.* 2004; INGENSAND, 2006).

2.5 SEGMENTAÇÃO DE FACHADAS A PARTIR DA NUVEM DE PONTOS

A segmentação é uma etapa importante e inevitável no processo de reconstrução tridimensional das fachadas de edifícios, pois esta objetiva a separação dos objetos ou feições presentes nas fachadas em função das características “homogêneas” e obedecendo a certos critérios. Isto já é conhecido no campo de processamento digital de imagens no Sensoriamento Remoto e torna-

se um passo importante para o tratamento e análise de dados de LET (GONZALEZ e WOODS, 2000).

No âmbito do processamento digital de imagens, os critérios de homogeneidade estão baseados em relação à resposta radiométrica da imagem, já no caso dos equipamentos LET a homogeneidade está baseada geralmente na posição dos pontos, os quais podem descrever uma superfície curva ou um segmento plano (BOULAASSAL, *et al.* 2009).

Nos últimos anos um grande número de métodos de segmentação de dados Laser Escaner foram propostos. A maioria destas técnicas foi desenvolvida inicialmente para dados Laser Escaner Aerotransportado. Estes dados são adquiridos em 2,5D, pois não se tratam estritamente de dados tridimensionais, pois o suporte espacial ainda é 2D, o que dá a possibilidade de transformar estes dados em imagens, não correndo o risco de perder informação importante (MASAHARU; HASEGAWA, 2000; INPE, 2006).

As nuvens de pontos obtido por Laser Escaner Terrestre são adquiridas em 3D (VOSSELMAN *et al.* 2004), assim a conversão destas nuvens de pontos em uma grade 2D causa uma grande perda de informação espacial (AXELSSON, 1999), isto porque os algoritmos de segmentação de imagens foram adaptados a estes novos dados 3D obtidos a partir dos LET.

O trabalho apresentado no 22nd CIPA Symposium de Kyoto no Japão em 2009, utilizou uma extensão do algoritmo de crescimento de regiões para extrair elementos planos das fachadas de edifícios de dados obtidos através de Laser Escaner Terrestre (PU; VOSSELMAN, 2006). Com relação aos algoritmos de crescimento de superfícies, seguindo o mesmo conceito, Wang e Tseng (2004) e Schnabel *et al.* (2007) propuseram uma segmentação baseada no algoritmo de divisão-fusão (*split-and-merge*) utilizando uma estrutura *octree*, a qual é equivalente a uma *quadtree* para o tratamento de imagens.

Trabalhos que tratam de segmentação de dados Laser Escaner, incluindo os citados acima, podem ser agrupados em dois grandes grupos. O primeiro grupo relativo às segmentações baseadas em algoritmos que usam o princípio da fusão ou agrupamento de feições e, o segundo grupo relativo as segmentações

baseadas no reconhecimento automático de formas geométricas (BOULAASSAL *et al.*, 2009).

2.5.1 Métodos de Segmentação

Na literatura encontram-se vários algoritmos voltados à extração de superfícies planas de dados provenientes de equipamentos Laser Escaner Terrestre. A maioria se propõe a criação de regiões homogêneas, normalmente baseadas nas suas características geométricas, sendo assim, pode-se dividir estes algoritmos em três grupos, a saber (SAPKOTA, 2008):

- Segmentação baseada em agrupamento por feições (*clustering of features*);
- Segmentação baseada no crescimento de regiões (*surface growing*);
- Segmentação por ajustamento de modelos (*fitting*);

2.5.1.1 Segmentação baseada em agrupamento por feições

Nestes algoritmos, medidas representativas são descritas para cada ponto, baseadas em suas características geométricas e radiométricas. Para todos os pontos do Laser Escaner geralmente se têm informações sobre sua posição, cálculo da normal, resíduos para as superfícies que melhor se ajustam e a refletância. Desta forma um espaço n-dimensional é construído para mapear as feições de cada ponto, depois disso os grupos são identificadas neste espaço e desta maneira pontos com mesmas características são unidos em um mesmo segmento (SAPKOTA, 2008).

Filin (2002) definiu sete dimensões para o vetor de atributos de cada ponto. A implementação deste agrupamento é realizada com base no vetor de atributos que consiste das seguintes medidas: a posição do ponto (X, Y, Z), os parâmetros do plano tangente a esse ponto e a diferença de altura relativa entre o ponto e seus vizinhos. Em vez de criar sete dimensões espaciais, o autor retirou os parâmetros de posição (X, Y, Z) reduzindo o número de dimensões espaciais para quatro. As

feições espaciais são agrupadas usando técnicas de classificação não supervisionada para identificar as classes de superfícies.

Depois de extrair as classes, os pontos são agrupados usando a proximidade espacial. Um exemplo do resultado alcançado através da segmentação baseada no agrupamento de feições é mostrado na sequência (FIGURA 20), do lado esquerdo os dados brutos obtido na varredura Laser e à direita os dados agrupados em feições tais como: telhado e solo.

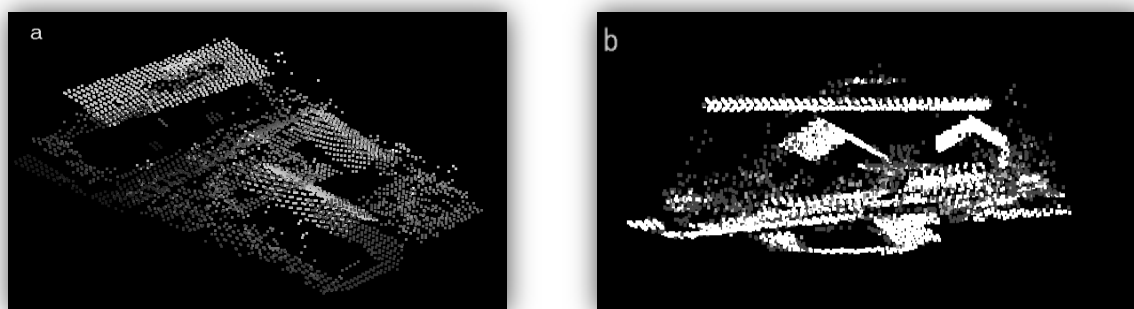


FIGURA 20 - SEGMENTAÇÃO POR AGRUPAMENTO DE FEIÇÕES a) DADOS BRUTOS,
b) DADOS AGRUPADOS
FONTE: Filin (2002)

2.5.1.2 Segmentação baseada no crescimento de regiões

Nesta técnica de segmentação o algoritmo começa com a escolha de um ponto e o crescimento das regiões ao redor deste ponto é baseado em certos critérios de similaridade. Segundo Vosselman *et al.* (2004) esta técnica de segmentação envolve basicamente os passos de identificação do ponto semente e o crescimento da região ao redor deste ponto semente.

2.5.1.2.1 Identificação da superfície semente

A superfície semente consiste em um grupo de pontos vizinhos que se ajustam a um plano, cilindro ou calota esférica, por exemplo, os pontos vizinhos a esta superfície são identificados e testados para verificar se estes se ajustam ao plano da superfície semente ou não. Se o plano encontrado se ajusta num certo

limiar predefinido, este plano é aceito como uma superfície semente, caso contrário, novos pontos são testados.

2.5.1.2.2 Crescimento da superfície semente

Uma vez que a superfície semente é selecionada, cada ponto desta superfície é comparado com o seu vizinho e, se este se ajusta ao plano definido, é então agregado a este plano. Esta operação é entendida como crescimento em torno da sua vizinhança. Assim, os pontos vizinhos são agregados à superfície semente obedecendo a certo critério e, cada vez que um ponto é agregado, a equação do plano é atualizada. A decisão para aceitar um ponto no plano pode ser baseada em um ou mais critérios, dentre os quais se podem citar (VOSSELMAN *et al.*, 2004):

- Proximidade do ponto: somente pontos que estão a certa distância da superfície semente são adicionados neste plano;
- Planaridade local: um ponto candidato é aceito em um segmento se a sua distância ortogonal ao plano formado por todos os pontos existentes no segmento está dentro de certo limiar;
- Superfície suavizada: para aplicar este critério, uma superfície normal local para cada ponto da nuvem é estimada. O ponto candidato é aceito se o ângulo entre a superfície normal local do ponto e a normal da superfície de crescimento estiver abaixo de um valor pré-estabelecido.

Muitas variações de técnicas de segmentação são sugeridas na literatura, Rabbani, et al (2006) apresentou um método para segmentar nuvem de pontos 3D para cenas industriais baseado em superfícies suavizadas. Este método consiste de dois passos: estimativa da normal de superfícies locais; e crescimento de regiões. No primeiro passo, a normal para cada ponto é calculada ajustando-se um plano para pontos vizinhos selecionados através de *K-nearest* ou fixando uma distância (raio) para os pontos vizinhos.

Rabbani, et al., (2006), utilizam os resíduos do plano detectado para aproximar estes resíduos a uma superfície curva. Os autores argumentam que os resíduos apresentados nos dados não estão em conformidade com os pontos da superfície plana detectada, podem ser aproximados para uma superfície curva em vez da superfície plana anteriormente utilizada. Assim estes resíduos são classificados e usados para a escolha de pontos sementes, tomando os pontos com resíduos pequenos numa primeira instância como pontos sementes.

O crescimento da segmentação é realizado previamente usando as normais dos pontos e seus resíduos, nesta fase os pontos são adicionados para o segmento pela sua proximidade e pelos critérios de suavização previamente estabelecidos (FIGURA 21).

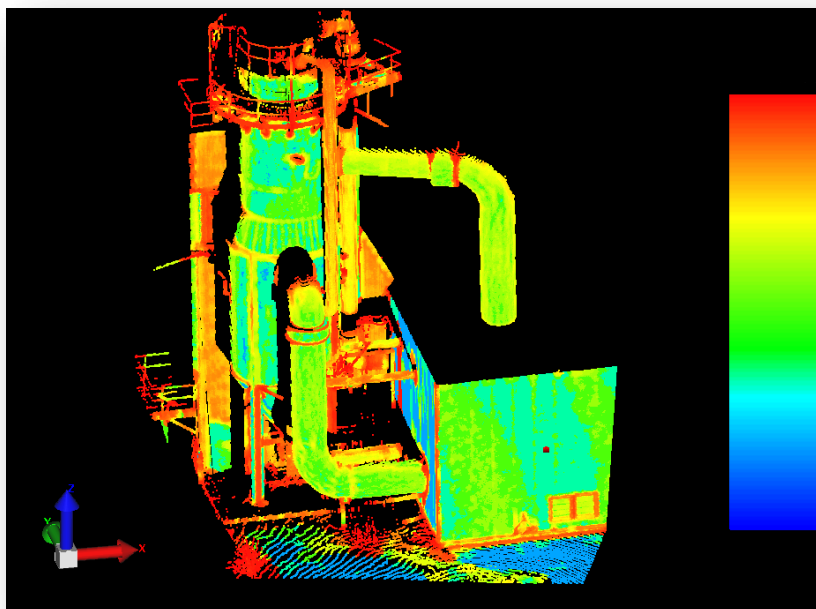


FIGURA 21 - SEGMENTAÇÃO POR CRESCIMENTO DE REGIÕES
FONTE: Rabbani, 2006.

Továri e Pfeifer (2005) descreveram um método de segmentação para dados de Laser Aerotransportado baseado no crescimento de regiões, o qual foi desenvolvido inicialmente para dados de Laser Escaner Terrestre. Primeiro foi usado a estimativa do vetor normal para cada ponto através de *K-nearest*, depois escolhido um ponto aleatoriamente, o qual é comparado com seus vizinhos e verificado se atende aos critérios estabelecidos. Se os critérios são atendidos os pontos sementes são utilizados para ajustar um plano.

Durante o crescimento da região os pontos adjacentes são adicionados aos segmentos obedecendo a critérios como o de similaridade, da distância ao plano e da distância ao ponto em análise. Para ajustar o plano, os valores dos autovetores e autovalores normalmente são usados como critérios para aproximar estes pontos ao plano.

2.5.1.3 Segmentação por ajustamento de modelos

Segundo Schnabel *et al.* (2007) a segmentação por ajustamento de modelos é baseada em observações feitas pelo homem sobre as feições presentes nos dados, que podem ser decompostos em primitivas geométricas tais como planos, cilindros e esferas.

O método trata de ajustar as figuras geométricas sobre a nuvem de pontos e uma vez ajustadas à primitiva, estas são rotuladas como um segmento. Contudo em dados de LET são encontrados muitos *outliers* causados por ruídos, erros nos registro entre as nuvens, ou até pelo fato do LET não estar calibrado. Mesmo assim, muitos métodos de estimação têm sido propostos com o intuito de conseguir extrair as primitivas geométricas. Dentre os mais importantes podemos citar: a transformada 3D de *Hough* e o **RAN**dom **SA**mple **C**onsensus (RANSAC).

2.5.1.3.1 Transformada 3D de *Hough*

A transformada 3D de *Hough* é uma ferramenta clássica utilizada no processamento digital de imagens. Esta permite detectar a presença de curvas através de formas paramétricas conhecidas como linhas ou cônicas por exemplo. A ideia por trás da transformada 3D de *Hough* é que cada linha no espaço euclidiano (O, x, y) pode ser definida por um par de pontos no espaço dos parâmetros (O', a, b). Uma reta é descrita no plano (O, x, y) pela equação (2.9).

$$y = ax + b \quad (2.9)$$

A ideia da transformada é a de detectar retas usando os pontos do plano (x, y) . Para isto é necessário calcular as coordenadas de cada ponto $M_i(x_i, y_i)$ e todos os parametros (a, b) que satisfazem a equação $y_i = ax_i + b$, com b fixo. Para cada ponto $M_i(x_i, y_i)$, há um conjunto de valores possíveis de parametros a e b , este conjunto forma uma reta de equação $b_i = -ax + y$, no espaço dos parâmetros (O', a, b) , também chamado de “espaço de *Hough*”.

Assim, dois pontos $P_i(x_i, y_i)$ e $P_j(x_j, y_j)$ na mesma reta formada no espaço dos parâmetros se cruzam em um ponto com coordenadas (a', b') . Por outro lado, todos os pontos pertencentes à mesma reta no espaço de parâmetros se cruzam no mesmo ponto no espaço euclidiano (FIGURA 22).

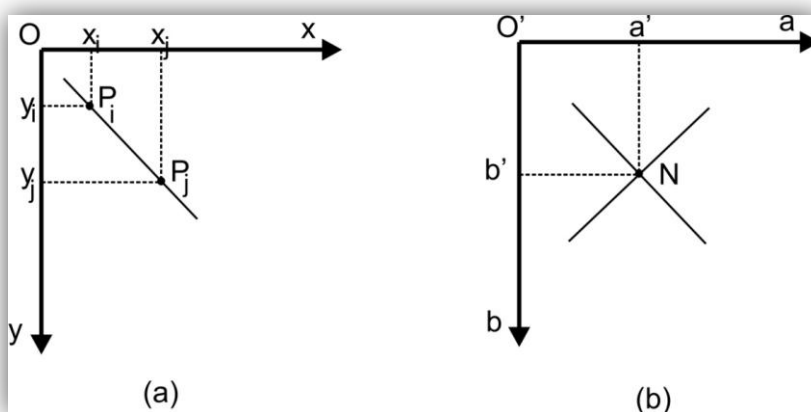


FIGURA 22 - OS DOIS ESPAÇOS DA TRANSFORMADA 3D DE HOUGH a) O ESPAÇO EUCLIDIANO, b) O ESPAÇO DOS PARÂMETROS.

FONTE: Adaptada de Boulaassal *et al.*, 2009.

A transformada 3D de *Hough*, que é uma extensão da transformada 2D de *Hough*, permite encontrar diretamente os pontos que se encontram em uma região plana pela estimativa dos parâmetros do plano. Cada plano pode ser representado pela seguinte equação:

$$Z = s_x X + s_y Y + d \quad (2.10)$$

onde s_x e s_y representam a declividade do plano ao longo dos eixos X e Y respectivamente e d a distância do plano à origem (0, 0, 0). Os três parâmetros s_x , s_y e d definem os parâmetros no espaço o qual é chamado de *Hough*.

Este método foi estendido para a transformada 3D de Hough usando apenas as nuvens de pontos 3D (Maas e Vosselman, 1999; Vosselman e Dijkman, 2001; Vosselman *et al.*, 2004). O trabalho de Vosselman *et al.* 2004, os autores mostram a transformada 3D de Hough aplicada à segmentação de dados de LET em equipamentos industriais, obtendo-se bons resultados pelo fato dos equipamentos industriais serem geralmente compostos de planos, esferas e cilindros (FIGURA 23).



FIGURA 23 - CILINDROS E PLANOS EXTRAÍDOS DE UMA CENA INDUSTRIAL.

FONTE: Adaptada de Vosselman *et al.* 2004

2.5.1.3.2 RANSAC (*RAN*dOm *S*Ample *C*onsensus)

O algoritmo RANSAC é amplamente utilizado como um estimador robusto dos parâmetros de modelos matemáticos que descrevem feições geométricas, mesmo em dados que podem conter um alto grau de ruído ou outlier. O algoritmo RANSAC introduzido por Fischler e Bolles (1981) é possivelmente o estimador robusto mais utilizado no campo da visão computacional.

O algoritmo de RANSAC tem sido aplicado na segmentação em movimento (TORR, 1995), mosaicagem (MCLAUCHLAN e JAENICKE, 2000), detecção de primitivas geométricas (CLARKE, *et al.* 1996), como na correspondência em imagens (LEONARDIS *et al.*, 1997). Assim, é utilizado em operações de correspondência em Fotogrametria, quando da necessidade de encontrar pontos homólogos em um par de imagens, mas também em trabalhos com nuvens de pontos. (CHUM; MATAS, 2002),

O algoritmo RANSAC é utilizado para a segmentação de entidades geométricas pela sua capacidade do reconhecimento automático das formas mesmo em dados que contenham ruídos. Bauer *et al.* (2005) utilizaram com sucesso o RANSAC para a extração dos planos das fachadas de edifícios a partir de dados de Laser Escaner Terrestre. Schnabel *et al.* (2007) também usou RANSAC na detecção de várias formas geométricas, tais como: planos cilindros, cones e toros em dados provenientes de LET.

Tarsha-Kurdi *et al.* (2007) fizeram um estudo comparativo entre o algoritmo RANSAC e a transformada de 3D de *Hough* (FIGURA 24). O objetivo era a extração dos planos dos telhados, a partir de dados LIDAR. Nesta comparação foi verificado analisando as segmentações, que o RANSAC é o mais adequado para a extração de planos em termos de tempo de processamento e, de insensibilidade ao ruído presente nos dados adquiridos através de Laser.

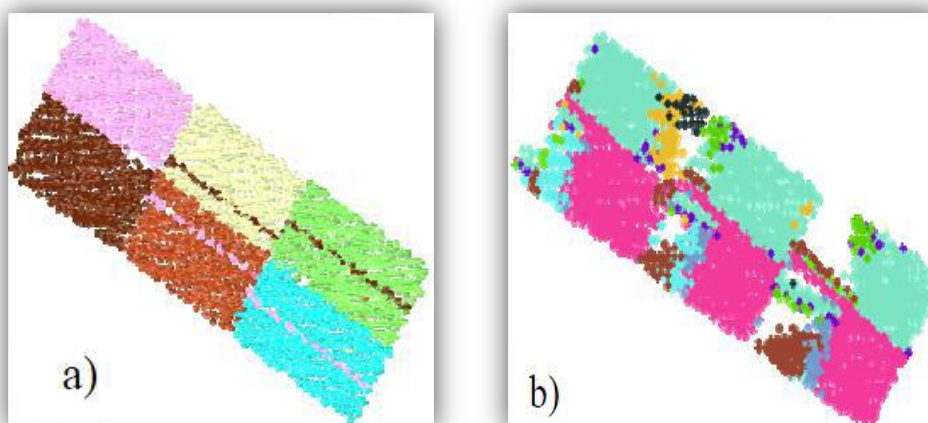


FIGURA 24 - RESULTADO DA EXTRAÇÃO DOS PLANOS DE TELHADOS
a) RANSAC; b) TRANSFORMADA 3D DE *HOUGH*

FONTE: Adaptado de Tarsha-Kurdi *et al.* (2007)

Recentemente, com o crescimento da obtenção de dados dos LET, o algoritmo de RANSAC tem gerado um crescente interesse para a extração de planos em fachadas de edifícios e de limites em áreas urbanas (DURUPT e TAILLANDIER, 2006). Boulaassal *et al.* (2009) realizou trabalhos de segmentação automática e extração das partes planas das fachadas de edifícios aplicando o algoritmo de RANSAC de forma sequencial, resultados que se mostraram promissores (FIGURA 25). No entanto, as fachadas de edifícios são compostas de vários planos uns próximos dos outros e às vezes se sobrepõem, portanto a tarefa é mais complicada se comparados com os dados obtidos por LIDAR (DEVEAU, 2006).

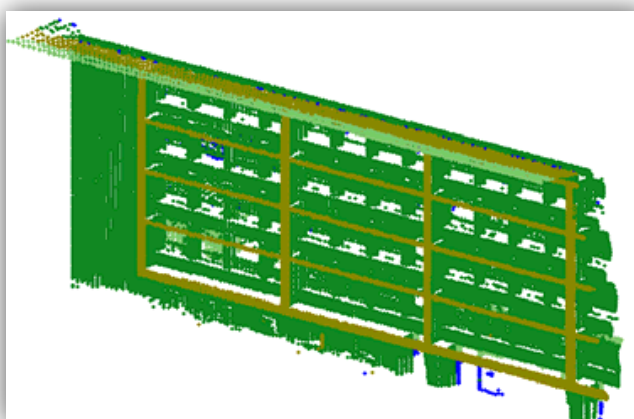


FIGURA 25 - DETECÇÃO SEQUENCIAL DE PLANOS USANDO RANSAC

FONTE: Adaptado de Boulaassal *et al.*, (2007).

O algoritmo RANSAC gera um grande número de formas primitivas, as quais são selecionadas aleatoriamente de um subconjunto de pontos e utilizadas para calcular os parâmetros de uma primitiva, um plano por exemplo. Assim, um mecanismo de pontuação é criado para identificar qual a melhor forma primitiva. Enquanto um plano é detectado, três pontos são selecionados aleatoriamente para estimar os parâmetros do plano candidato, depois os pontos remanescentes são testados adotando algum limiar, assim uma pontuação é dada para o plano baseado no número de pontos que estão dentro do limite de distância em relação ao plano.

Se a pontuação é maior do que algum limiar, o plano candidato é considerado como o plano detectado. Assim, o procedimento citado acima é

repetido guardando a pontuação do plano que detêm a maior pontuação. Depois de um número suficiente de repetições, o plano com o maior pontuação é considerado o plano a ser adotado, ou reportado como uma falha (BOULAASSAL *et al.*, 2007).

Schnabel *et al.* (2007) reportam que a complexidade do algoritmo RANSAC é dada por dois grandes fatores: o número mínimo de candidatos que são desenhados; e o custo para avaliar a pontuação de cada plano candidato. Isto é o número de planos candidatos que tem uma pontuação elevada tem que ser considerados como os planos candidatos, dentre os quais se tem a probabilidade de encontrar realmente o melhor plano. O número mínimo de repetições (T) requerido para detectar o plano com uma probabilidade (p_i) é dado por:

$$T \geq \frac{\ln(1 - p_i)}{\ln(1 - \omega^3)} \quad (2.11)$$

onde:

ω : é a fração de *inliers*.

O número de ensaios de T está diretamente ligado ao conhecimento de p_i e ω . O valor de p_i geralmente é mantido entre 0,9 e 0,99. O problema está no não conhecimento do valor de ω a priori. Uma técnica para esta estimativa é dar um valor baixo para ω e ir atualizando o valor de ω progressivamente.

Bretar e Roux (2005) propuseram um algoritmo para detectar as faces de telhados baseados em vetor normal orientado chamado de ND-RANSAC (*Normal Driven Random Sample Consensus*). Para este propósito, eles calcularam primeiramente os vetores normais para cada ponto e depois escolheram do conjunto três pontos aleatoriamente, aqueles que tinham a mesma orientação do seu vetor normal. O número de planos aleatórios é escolhido através de análises estatísticas da distribuição normal dos vetores usando a esfera Gaussiana para a cena.

A segmentação é um passo importante na modelagem tridimensional e consequentemente a qualidade do produto final é diretamente dependente da qualidade da segmentação. De acordo com Schnabel *et al.* (2007) se pode dizer que a segmentação destaca duas grandes famílias em questão de abordagens. A

primeira usa relações de proximidade e semelhança para segmentar a nuvem de pontos do Laser Escaner Terrestre, caracterizada essencialmente por algoritmos como o de crescimento de regiões. Já a segunda família aborda a segmentação através de operações para o reconhecimento automático das características geométricas, o que normalmente são técnicas utilizadas no campo da visão por computador (*computer vision*), que é o caso do algoritmo RANSAC e a Transformada 3D de *Hough*.

Assim sendo, a segmentação e extração das características dos planos das fachadas explorarão as vantagens da segunda família, mais especificamente, o algoritmo de RANSAC por se tratar de um algoritmo robusto, mesmo na presença de ruídos, que é o caso dos dados de Laser Escaner Terrestre quando da extração de planos de fachadas e transformação dos resultados em modelos vetoriais.

A metodologia desenvolvida irá comprovar a relevância do uso dos dados provenientes de LET junto com o algoritmo de RANSAC na extração das características geométricas de edificações e consequentemente reproduzir os modelos de fachadas de edifícios. Todo o desenvolvimento metodológico de transformação dos dados LET para a reprodução das fachadas foi desenvolvido em MATLAB.

2.5.2 Extração dos Contornos das Feições

Na literatura encontram-se vários métodos para extração de contornos. Neste trabalho de pesquisa foi utilizada a triangulação de *Delaunay* e seus princípios para a execução desta etapa.

2.6.2.1 Triangulação de *Delaunay*

A triangulação de *Delaunay* (FIGURA 26), desenvolvida pelo matemático Russo Boris Delone (1890 – 1980) em 1934, é aplicada ao conjunto de pontos do plano que atende ao critério da triangulação: se somente houver três vértices sobre o círculo-circundante e nenhum em seu interior, as arestas que satisfizerem a tal

critério são mantidas; as demais são eliminadas ou substituídas por outras que atenderam ao critério círculo-circundante. Em outras palavras, essa regra estabelece que o círculo-circundante de um triângulo não deve conter outros pontos além dos pontos do triângulo. A triangulação de *Delaunay* maximiza o ângulo mínimo e minimiza o ângulo máximo de todos os triângulos na triangulação.

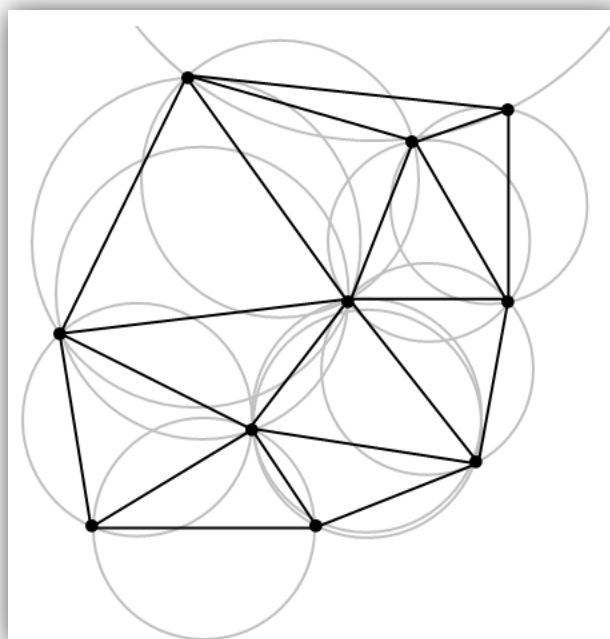


FIGURA 26 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY
COM CÍRCULOS-CIRCUNDANTES
FONTE: Adaptado de Borouchaki al, 1997

Quando se fala em triangulação de *Delaunay*, nos leva a comentar sobre o diagrama de *Voronoi*, já que ambos os algoritmos estão relacionados. Sejam, P os pontos que compõem a nuvem, a construção da triangulação de *Delaunay* pode ser estabelecida usando o fato de que o grafo dual do diagrama de *Voronoi* sobre os pontos P . O diagrama de *Voronoi* é composto de um conjunto de células V_i , definidas matematicamente pela seguinte expressão (BOROUCHAKI et al, 1997):

$$V_i = \{Pt \in (P) \text{ tal que } d(Pt, Pt_i) \leq d(Pt, Pt_j), \text{ para todo } j \neq i\} \quad (4.18)$$

onde d é a distância euclidiana entre dois pontos.

Cada célula V_i , é o lugar geométrico do ponto mais próximo, do conjunto de pontos (P), estas células são polígonos convexos fechados. A cada célula do diagrama de *Voronoi* está associado somente um ponto da triangulação de *Delaunay*. Estes vértices são conectados por uma aresta se os pontos são vizinhos, ou seja, se juntarmos os vértices de (P) duas células adjacentes, há a triangulação de *Delaunay* como é mostrado na Figura 27 há uma propriedade de ortogonalidade entre as células de *Voronoi* e a triangulação de *Delaunay*.

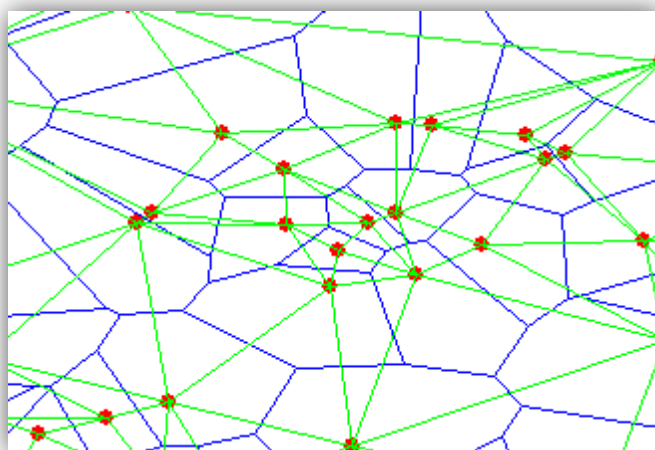


FIGURA 27 - SUPERPOSIÇÃO ENTRE AS CELULAS DO DIAGRAMA DE VORONOI E A TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY.

FONTE: Adaptado de Borouchaki *et al.* 1997

A triangulação de *Delaunay* em 2D foi utilizada neste trabalho para extrair os pontos que compõem os contornos dos segmentos planos segmentados pelo algoritmo de RANSAC, os quais descrevem os elementos arquitetônicos das fachadas dos edifícios.

3 ÁREAS DE ESTUDO E MATERIAIS

Nesta seção são descritas as áreas de estudo utilizadas para o desenvolvimento da metodologia e os equipamentos utilizados na coleta dos dados Laser Escaner Terrestre.

3.1 ÁREAS DE ESTUDO

Objetivando desenvolver a metodologia, foram selecionadas duas áreas de estudo: uma na cidade de Curitiba – Brasil e a outra na cidade de Vigo - Espanha. Em Curitiba foi escolhida a Sociedade Garibaldi, que está localizada no centro histórico da cidade e, em Vigo, foi escolhido o Paço de Quiñones de León, atual sede do Museu de Castrelos.

3.1.1 Paço Quiñones de León

O Paço de Quiñones de León, ou antigo Paço de Lavandeira, ou ainda Paço de Castrelos, é um edifício que exemplifica a arquitetura renascentista urbana castelhana na Galícia, e que tem um corpo central ladeado por duas torres (FIGURA 28). Construído no século XVII pelo Capitão Juan Tavares, está localizado no Parque de Castrelos, na cidade de Vigo, província de Pontevedra, noroeste da Espanha (FIGURA 27). O Paço foi objeto de numerosas reformas no final do século XIX e princípio do século XX e a partir de 1924 foi doado à cidade pelo Marquês de Alcedo Don Fernando Quiñones de León, condicionado a que se fizesse um museu e um parque público.

O museu dispõe de 29 salas de exposição permanente, biblioteca e diversas exposições sobre temas arqueológicos. Na planta baixa se preserva o ambiente da antiga residência dos marqueses, como o mobiliário e a decoração da época e uma exposição permanente de pintura europeia dos séculos XVII e XVIII, como também abriga numerosos objetos relativos à cultura local.

A seção destinada à arqueologia mostra objetos que ilustram diversos períodos da pré-história da Cidade de Vigo, é um recorrido do Paleolítico até a Idade Média. Outra seção destina-se à arte Galega que constitui uma mostra de pintura e esculturas Galegas no final do século XIX até os dias de hoje.

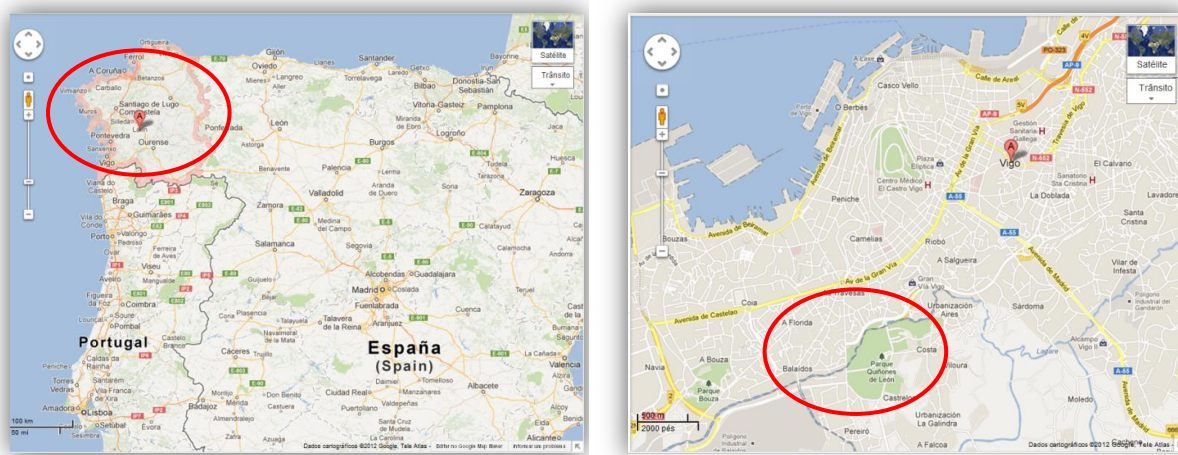


FIGURA 28 - LOCAIZAÇÃO DA GALICIA E PARQUE DE CASTRELOS – VIGO – ESPANHA
FONTE: www.google.com



FIGURA 29 - PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
FONTE: O autor (2012)

3.1.1 Sociedade Garibaldi

A Sociedade Garibaldi, fundada em 1883, nasceu da ideia de se congregar, sob um mesmo ideal, os imigrantes italianos em Curitiba. O mesmo ideal que levou Giuseppe Garibaldi a lutar pela Revolução Farroupilha (1839 -1841) no Brasil, pela unificação da Itália. Na prática, a Sociedade permitia compartilhar interesses e necessidades entre os italianos radicados em Curitiba.

O Palácio (FIGURA 30), cuja construção foi iniciada em 1887, foi projetado por Ernesto Guaita, engenheiro e agente consular da Itália, e teve sua conclusão em 1904. A fachada principal, em estilo neoclássico, só ficou pronta em 1932, uma obra do arquiteto João de Mio, o mesmo arquiteto da Igreja de São Pedro, construída no bairro Umbará.



FIGURA 30 - PALÁCIO GUISEPPE GARIBALDI
FONTE: O autor (2012)

O edifício foi palco importante na história do movimento operário paranaense, tendo sediado, em 1906, o Iº Congresso Estadual, quando foi gerada a Federação Operária no Paraná. Em 1943, durante a Segunda Guerra Mundial, o Palácio foi desapropriado pelo governo, teve uso como Palácio da Justiça e sede do Tribunal Regional Eleitoral. Foi devolvido à Sociedade Garibaldi em 1962, sendo tombado pelo Patrimônio Histórico e Artístico do Paraná em 1988, mas continua

campo de visão e a densidade de varredura podem ser fixados pelo usuário. É possível o registro ou varredura de até 1800 pontos por segundo. A unidade de varredura possui também uma máquina fotográfica digital acoplada, com resolução de 1 megapixel, onde cada foto enquadra 24° x 24° de cena.

O pulso Laser possui comprimento de onda de 532 nm (faixa visível – verde) e potência inferior a 1 miliWatt, sendo classificado como classe 3R, segundo o padrão IEC (*International Electrotechnical Commission*) 60825-1(2001), que considera os riscos como sendo seguros quando manipulado com cuidado e potencialmente perigoso aos olhos se observado por meio de instrumentos ópticos.

A medida de distância do Cyrax HDS 3000 se baseia no princípio do intervalo de tempo. O sistema mede as coordenadas tridimensionais dos pontos (x, y, z), além de medir também a intensidade do sinal de retorno dos objetos capturados. Na Tabela 2 são apresentadas as principais especificações do sistema Cyrax HDS 3000. Estes valores fornecidos pelo fabricante são para operações realizadas a uma distância de 50 metros, mas o alcance máximo de operação do equipamento é de 100 metros. Para maiores informações ver o Anexo 1.

TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER CYRAX HDS - 3000

Acurácia em distância (z)	±4mm
Acurácia planimétrica (x, y)	±6mm
Acurácia angular – incremento do ângulo IFOV	± 60 microradianos 12"
Acurácia da superfície modelada	± 2mm
Acurácia com aquisição de alvos	± 1,5mm
Campo de visão FOV	360° horizontal, 270° vertical
Tamanho da projeção do LASER	6 mm
Distância mínima de operação	1 m
Distância máxima de operação	100 m
Taxa de varredura	1.800 pontos por segundo

FONTE: Manual do Laser Escaner Terrestre CYRAX HDS – 3000 (2006)

Para o levantamento realizado no Paço Quiñones de León utilizou-se o Laser Escaner Terrestre RIEGL Z390i o qual também é baseado no princípio de tempo de voo, tendo uma fonte de Laser que emite pulsos com um comprimento de onda de 1 500 nm. Esse dispositivo mede as distâncias na faixa de 1,5 a 400 m, com uma precisão nominal de 6 mm a uma distância de 50 m com iluminação e condições normais de refletividade. O campo de visão se estende de 80 ° na vertical e 360° na horizontal. A resolução mínima e máxima angular é de 0,2° e 0,002°, respectivamente.

A taxa de aquisição é de 11.000 pontos por segundo. A divergência do feixe é de 0,3 mrad, o equivalente a 30mm por 100m de alcance. A intensidade do sinal recebido pelo sistema sensor é gravada em 8 bits [0 - 255]. A Tabela 3 mostra as especificações técnicas do RIEGL Z390i. Para mais detalhes ver o Anexo 2.

TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER RIEGL Z390i

Acurácia em distância (z)	± 6 mm
Acurácia planimétrica (x, y)	± 6 mm
Acurácia angular – incremento do ângulo IFOV	± 60 microradianos 12"
Acurácia da superfície modelada	± 2mm
Acurácia com aquisição de alvos	± 1,5mm
Campo de visão FOV	360° horizontal, -40° a 40° vertical
Tamanho da projeção do LASER	6 mm
Distância mínima de operação	1 m
Distância máxima de operação	400 m
Taxa de varredura	11.000 pontos por segundo

FONTE: Manual do Laser Escaner Terrestre RIEGL Z390i (2009)

3.2.2. Estação Total

Para verificar a acurácia das formas arquitetônicas extraídas das fachadas nesta pesquisa, foram obtidas coordenadas de alguns pontos de controle. Em ambos os levantamentos utilizou-se uma Estação Total Eletrônica Leica TCR 1102.

Este equipamento possui coletor interno para 18.000 pontos, transferência de dados bidirecional, 12 programas aplicativos incorporados, bateria interna NiMH de 6 volts. Na Tabela 4 são apresentadas as principais especificações da Estação Total Leica TCR – 1102. Para demais informações ver o Anexo 3.

TABELA 4 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ESTAÇÃO LEICA TCR 407

Acurácia angular	2 “
Acurácia das medidas de distância	$\pm 2\text{mm} + 2\text{ppm}$
Divergência do feixe Laser (50 m)	10 mm x 20 mm
Frequência de modulação	300 MHz
Potência de saída máxima	1 mWatt
Comprimento de onda	660 nm (vermelho)
Resolução	0,1 mm
Distância mínima de operação	1,5 m
Distância máxima de operação	80 m sem prisma
Tempo de medição	1 s + 0,5s/10 m
Dimensões do Instrumento	151 x 203 x 316 mm (CxLxA)
Temperatura de operação	-20°C a +50°C

FONTE: Manual da estação total TCR – 1102 (2009)

3.3 PROGRAMAS UTILIZADOS

Para o levantamento realizado no Palácio Giuseppe Garibaldi, foi utilizado o *Software Cyclone*, desenvolvido pela Leica-Geosystems, que acompanha o equipamento. Este *software* é utilizado para a configuração do sensor, aquisição de dados, visualização, manipulação e o arquivamento dos dados. Além disso, o Cyclone fornece como opção de exportação os formatos DXF para manipulação em AutoCAD e TXT para obtenção das coordenadas tridimensionais (x, y, z) e da intensidade dos pontos e dos valores RGB (*Red, Green e Blue*).

Para o levantamento do Paço Quiñones de León, o *software* RiscanPro desenvolvido pela RIEGL, que acompanha os equipamentos Laser Escaner Terrestre 3D da série LMS-Z da mesma marca, foi utilizado para a configuração do sensor, aquisição de dados, visualização, manipulação e o arquivamento dos dados. Da mesma maneira que o *software* Cyclone, o RiscanPro permite a exportação dos dados, nos formatos DXF e TXT.

O ambiente AutoCAD foi utilizado na visualização das cenas obtidas, rotação dos dados, verificação de distâncias, áreas, volumes, entre outras operações.

No ambiente MatLab, utilizando as bibliotecas (*toolkits*), foi possível adequar e implementar tanto o algoritmo RANSAC como a triangulação de *Delaunay* para o processamento das nuvens de pontos e a extração das feições das fachadas. Nesse ambiente, também foram gerados gráficos dos experimentos que exemplificam a metodologia.

4 METODOLOGIA

Na literatura são apresentadas diversas metodologias, discutidas no capítulo anterior, para segmentar e extrair as feições (contornos) das fachadas das edificações, considerando-se informações (dados) provenientes de uma varredura Laser Escaner Terrestre. No contexto deste trabalho procurou-se elaborar procedimentos automáticos de segmentação e extração de contornos de fachada de edificações, visto que esta é permeada de grandes dificuldades, apesar da solução aparentemente simples, quando realizada manualmente.

Na primeira etapa, correspondente ao levantamento, foi realizada a varredura Laser das duas áreas escolhidas para a aplicação da metodologia proposta, obtendo dois conjuntos de dados, ou seja, duas nuvens de pontos. Esta etapa é seguida do pré-processamento, que consiste em verificar a integridade dos dados obtidos e a exportação dos dados em arquivo de formato texto contendo as coordenadas (X, Y, Z) das fachadas.

Na sequência, realizou-se a orientação da nuvem de pontos, de forma a torná-la perpendicular em relação ao sistema de coordenadas (coordenada X) do Laser Escaner Terrestre, com o intuito de facilitar a filtragem dos dados. Nesta etapa utilizou-se o algoritmo RANSAC, implementado em MatLab, a fim de determinar o plano principal. Ainda no ambiente MatLab, foi implementada uma filtragem automática através de um filtro de profundidade para eliminar os pontos que não pertenciam às fachadas.

Com este novo conjunto de dados foi aplicado novamente o algoritmo RANSAC, agora com o objetivo de segmentar os dados. Complementarmente à segmentação pelo RANSAC, efetuou-se um trabalho de determinação dos pontos de bordas dos segmentos (planos) através do método de triangulação de *Delaunay*, posteriormente utilizado para linearizar as linhas (retas) existentes nas fachadas (elevações) dos edifícios. Este processo foi realizado aplicando o método de mínimos quadrados.

A última etapa consistiu em transformar as linhas definidas em entidades geométricas para então poder utilizá-las em softwares gráficos, como o AutoCAD por exemplo. As etapas para a segmentação dos dados oriundos da varredura

LASER e extração dos planos são mostradas na figura a seguir (FIGURA 32) e na sequência são detalhadas cada uma destas etapas.



FIGURA 32 - ETAPAS DA DETERMINAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DAS FORMAS ARQUITETÔNICAS ATRAVÉS DE DADOS LIDAR
FONTE: O autor (2012)

4.1 COLETA DOS DADOS LASER

Conforme mencionado anteriormente, os dados de varredura Laser foram obtidos em duas campanhas diferentes, uma realizada no Brasil, na fachada do Palácio Giuseppe Garibaldi, no qual se utilizou um Laser Escaner Terrestre HDS – 3000 da Leica. O resultado desta campanha corresponde a uma nuvem de pontos referente a esta fachada (FIGURA 33).

A segunda campanha foi realizada na Espanha, na fachada de Paço Quiñones de León. A nuvem de pontos adquirida desta fachada foi obtida através da varredura com um Laser Escaner Terrestre LMS Z390i da Riegl (FIGURA 34).

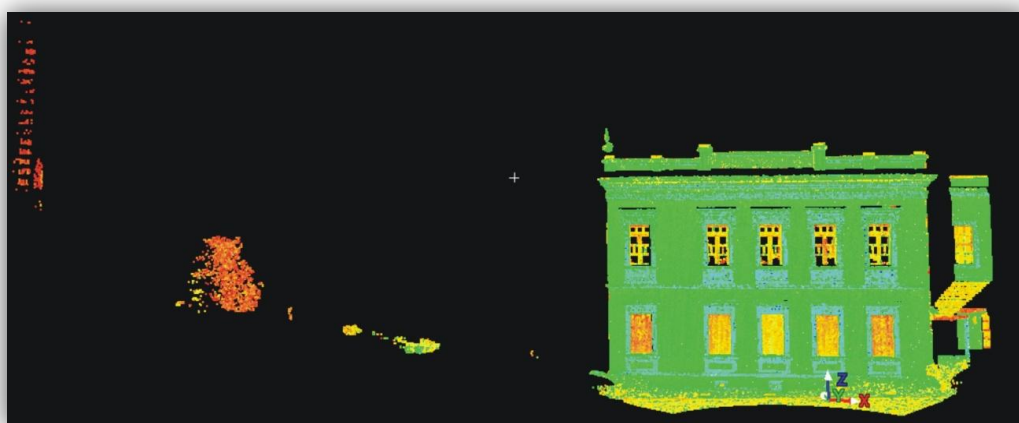


FIGURA 33 - NUVEM DE PONTOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
FONTE: O autor (2012)

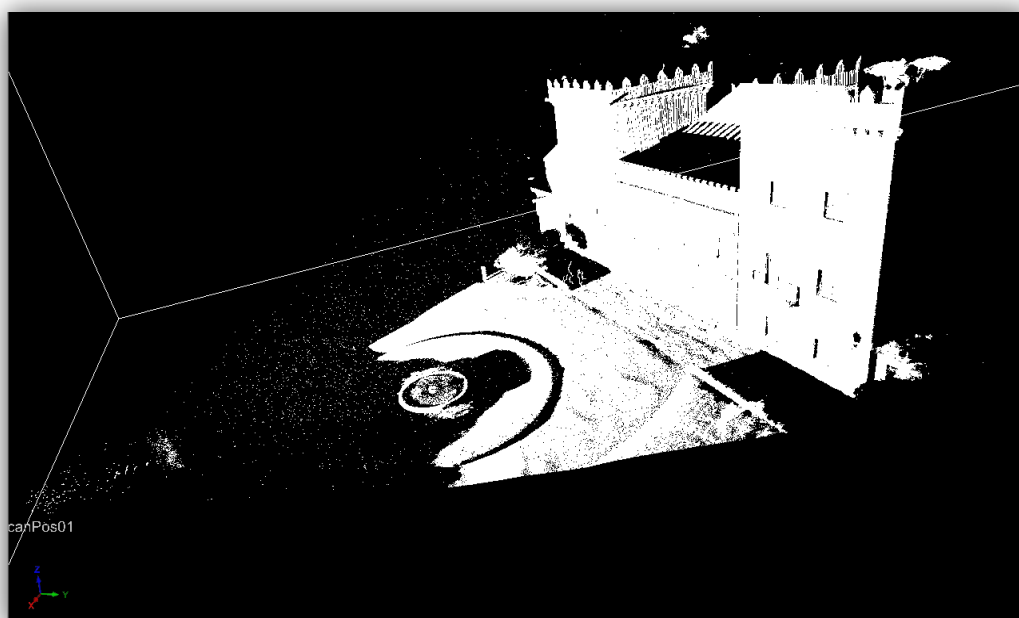


FIGURA 34 - NUVEM DE PONTOS – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
FONTE: O autor (2012)

4.1.1 Densidade de pontos

A varredura aleatória com uma alta densidade de pontos pode descrever detalhadamente elemento arquitetônico, embora sejam discutíveis os intervalos que diferenciam a escala urbana, a arquitetônica e a voltada para objetos menores, como, por exemplo, esculturas.

Como este trabalho considera a escala arquitetônica (tamanho da edificação), que ocupa tamanhos que vão desde 15 metros até 100 metros, se optou por uma realizar o levantamento com resolução de 5x5 cm para a escala geral, ou seja, foi determinado um ponto a cada 5 cm na fachada, aproximadamente. Para os detalhes da fachada optou-se por realizar o levantamento com resolução de 1x1 cm, que segundo Mills *et al.* (2006), consiste da resolução mínima para detectar um detalhe com 68% de confiabilidade. Para chegar a este valor de confiabilidade Mills *et al.* (2006) sugere a seguinte fórmula:

$$Q = 1 - \left(\frac{m}{\lambda} \right) \quad (4.1)$$

onde:

Q : é a qualidade dos dados;

m : é a espaçamento dos pontos sobre o objeto;

λ : é o tamanho mínimo das feições do objeto.

4.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Como foi mencionado no capítulo 3, o algoritmo de RANSAC foi desenvolvido por Fischler e Bolles (1981), como um estimador robusto e consiste de uma ferramenta de segmentação para extrair primitivas geométricas cujos modelos matemáticos são conhecidos, tais como: planos, esferas ou cilindros. Por outro lado, este algoritmo, na sua forma básica, é usado para estimar os parâmetros de um modelo matemático, o caso de um plano, mesmo com a presença de ruídos nas observações. Esta característica torna este algoritmo particularmente eficaz no processamento de dados de Laser Escaner Terrestre, porque os dados provenientes destes equipamentos não estão imunes à presença de ruídos (*outliers*).

Seu princípio de funcionamento é: o algoritmo executa de forma iterativa uma seleção aleatória de um conjunto mínimo de pontos (amostra) suficiente para estimar os parâmetros de um modelo matemático. Após o cálculo do modelo, os pontos “próximos” a ele, situados dentro de um intervalo de tolerância pré-definida, são aceitos como pertencentes a este modelo. A parcela de pontos válidos é chamada de *inliers* (pontos válidos), assim, o modelo que contenha o maior número de *inliers* é escolhido e considerado como o modelo mais adequado dentro do conjunto de dados.

O tamanho da amostra corresponde ao número mínimo requerido para encontrar o modelo. Por exemplo, para definir os parâmetros de um plano, a amostra deve conter um mínimo de três pontos não alinhados. Então todos os pontos válidos são determinados através do cálculo da distância que os separa do plano modelado; e qualquer ponto localizado a uma distância inferior que a distância de tolerância predeterminada é considerada como sendo um *inlier*. A seguir é explicitado o algoritmo matematicamente para uma melhor compreensão.

Os dados provenientes de um Laser Escaner Terrestre estão caracterizados pelas suas coordenadas tridimensionais (X, Y, Z), informações sobre a intensidade de cada ponto (*i*) e os valores de (R, G, B). Uma nuvem de pontos pode ser apresentada como uma matriz (*NP*) de 7 colunas e o número de linhas igual ao número total de pontos obtidos no levantamento. A Equação (4.2) descreve a matriz que contém os dados.

$$NP = [x, y, z, i, r, g, b]_{N,7} \quad (4.2)$$

onde:

$[x, y, z]$: coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos 3D;

i : intensidade do sinal de retorno;

$[r, g, b]$: componentes (vermelho, verde, azul) associados ao pixel no ponto;

N : número de linhas da matriz, igual ao número de pontos da nuvem.

Para este trabalho foram utilizadas apenas as coordenadas cartesianas tridimensionais dos N pontos da nuvem, então a Equação (4.2) passa a ter apenas 3 colunas, mantendo o número de linhas, podendo ser reescrita por:

$$NP = [x, y, z]_{N,3} \quad (4.3)$$

Designa-se $S = \{p_1, \dots, p_k\}$ à amostra de partida, composta pelo número mínimo de pontos necessários para calcular os parâmetros de um modelo matemático $M(a)$ definido da seguinte forma:

$$M(a) = \{a \in pr: F_M(pr; a) = 0\} \quad (4.4)$$

onde:

$pr = \{a_1, \dots, a_h\}$: vetores dos parâmetros do modelo a estimar;

$p \in S$: conjunto dos pontos para o cálculo dos parâmetros pr ;

F_M : função que descreve o modelo matemático.

Como o propósito do trabalho é a determinação dos planos existentes em fachadas arquitetônicas, toma-se como exemplo, para ilustrar o procedimento, a determinação de um plano dentro do espaço 3D. Um plano está definido por um número mínimo de três pontos não alinhados $S = \{p_1, p_2, p_3\}$, a partir dos quais se pode calcular os vetores de quatro parâmetros $pr = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$. O modelo matemático pode se definido da seguinte forma:

$$M(a) = \{a_1 \leq i \leq a_4 \in pr: F_M(pr; a) = a_1x + a_2y + a_3z + a_4 = 0\} \quad (4.5)$$

onde:

$[a_1, a_2, a_3]$: são as componentes normais de um plano;

a_4 : distância do plano à origem.

O conjunto de pontos que melhor se ajusta ao modelo, anteriormente iniciado pela amostra S , escolhida aleatoriamente, é chamado de “*Consensus Set*” (CS), conjunto de consenso. Estes pontos pertencem ao modelo matemático (plano) $M(a)$, com um erro inferior ou igual a uma tolerância predefinida τ . A equação (4.6) define o “*Consensus Set*” (CS), no qual estão todos os pontos que compõem o plano em questão.

$$CS(a) = \{p \in NP: e(p, M(a)) \leq \tau\} \quad (4.6)$$

onde:

τ : tolerância, abaixo da qual todos os pontos pertencem ao conjunto CS;

$e(p, M(a))$: erro do ponto p para com o modelo $M(a)$.

Da equação (4.6), a distância entre o ponto e o modelo $M(a)$, é calculado pela fórmula (4.7):

$$e(p, M(a)) = \min_{p^* \in M(a)} (dist(p, p^*)) = \min_{p^* \in M(a)} (\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p_i^*)^2}) = (\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p_i^*)^2}) \quad (4.7)$$

onde:

p_i^* : é a projeção ortogonal do ponto p_i ao modelo $M(a)$.

A escolha das amostras necessárias para inicializar a definição do modelo é feita de forma aleatória e iterativa. O algoritmo de RANSAC determina o número ótimo de amostras necessárias para encontrar o melhor modelo com uma probabilidade P . Se denominarmos de W a probabilidade de escolher um ponto válido e os três pontos para definir o plano, os quais são realizados de forma independente, então a probabilidade de encontrar 3 pontos válidos é de $(W \times W \times W) = W^3$.

Portanto há uma probabilidade igual a $(1 - W^3)$ de que um desses pontos faça parte deste processo. Consequentemente, para N iterações, a probabilidade será multiplicada por N vezes, o que corresponde à probabilidade de o algoritmo selecionar qualquer amostra de três pontos válidos cada vez é igual a $(1 - P)$, daí resultas a seguinte igualdade:

$$(1 - W^3)^N = (1 - P) \quad (4.8)$$

onde:

P : é a probabilidade de ter uma amostra inicial “boa” para o plano;

W : probabilidade de encontrar um ponto válido a cada iteração.

Então a probabilidade W de encontrar um ponto válido (*inlier*) a cada iteração é expresso por:

$$W = \frac{\text{número de pontos válidos (inliers)}}{\text{número total de pontos (nuvem)}} = \frac{CS}{NP} \quad (4.9)$$

onde:

CS : número de pontos no *Consensus Set*;

NP : número de pontos total na nuvem.

Portanto o, número total de iterações é dado pela seguinte expressão:

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - W^3)} \quad (4.10)$$

onde:

P : é a probabilidade de ter uma amostra inicial “boa” para o plano;

W : probabilidade de encontrar um ponto válido a cada iteração.

Geralmente, o número de iterações está relacionado com a proporção de dados que contém os ruídos, mas também com o número mínimo de pontos necessários para inicializar o modelo. O que pode ser realizado, utilizando a equação (4.9), é fornecer valores para P e W e calcular o número de iterações. A escolha dos valores destes parâmetros é realizada de maneira empírica. Assim para valores de P , são escolhidos valores no intervalo de $(0,95 \leq P \leq 0,99)$ para que a extração do plano esteja associada a uma alta probabilidade.

No entanto, para valores de W , não se tem como saber quantos pontos válidos (*inliers*) estão nos dados brutos. Para solucionar este problema Hartley e Zisserman (2003) propuseram uma adaptação no algoritmo de RANSAC para o cálculo de W e consequentemente reduzir o número de iterações N .

O pseudocódigo, proposto na adaptação de Hartley e Zisserman (2003) é mostrado a seguir:

- $N = \infty$, $sample_count = 0$.
- *While* $N > sample_count$ *Repeat*
 - *Choose a sample and count the number of inliers.*
 - *Set , $\varepsilon = 1 - (\text{número de inliers})/(\text{número total de pontos})$*
 - *Set N from ε with $p = 0.99$.*
 - *Increment the $sample_count$ by one.*
- *Terminate.*

4.2.1 Determinação do Plano da Fachada

O algoritmo RANSAC inicia a determinação do plano da fachada a partir de três pontos escolhidos aleatoriamente, o que significa determinar a normal e sua distância a origem. Algebricamente, um plano pode ser definido:

- pela combinação linear de dois vetores diretores no plano;
- pela definição de um vetor normal e de um ponto não pertencente a este vetor;
- por três pontos não colineares.

Como os planos determinados pelo algoritmo de RANSAC são definidos por pontos, através de suas coordenadas cartesianas, a terceira opção é a que foi implementada. Para determinação de um plano (PL), são selecionados três pontos não colineares, a saber, $M_1(x_1, y_1, z_1)$, $M_2(x_2, y_2, z_2)$ e $M_3(x_3, y_3, z_3)$. Assim, para qualquer ponto $M(x, y, z)$ que pertence ao plano definido pelos três pontos M_1 , M_2 e M_3 , pode-se definir três vetores $(\overrightarrow{M_1M}, \overrightarrow{M_2M}, \overrightarrow{M_3M})$ que são coplanares, isto quer dizer que o seu determinante deve ser zero, ou seja:

$$\det(\overrightarrow{M_1M}, \overrightarrow{M_2M}, \overrightarrow{M_3M}) = \begin{vmatrix} x - x_1 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y - y_1 & y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z - z_1 & z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (4.11)$$

Assim o plano (PL), pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} (PL): (x - x_1) \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} + (y - y_1) \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \\ + (z - z_1) \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

A equação do plano pode ser expressa por:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4.13)$$

com:

$$\begin{aligned}
 a &= \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \\
 b &= \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \\
 c &= \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} \\
 d &= -x_1a - y_1b - z_1c
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

onde:

(a, b, c) : normal ao plano PL ;

d : distância à origem das coordenadas.

Assim, uma vez que os parâmetros do plano são determinados, pode-se determinar quais pontos da nuvem pertencem a este plano ou quais pontos estão próximos deste, dentro de um intervalo predeterminado.

4.2.2 Determinação dos *inliers* (pontos válidos pertencentes ao plano)

Na determinação dos pontos que pertencem ao plano definido anteriormente, calculou-se qual é a distância euclidiana de cada ponto $M(x_0, y_0, z_0)$ da nuvem de pontos obtida pelo Laser Escaner Terrestre e o plano (PL), através da seguinte expressão (SANTOS, 1982):

$$DIST(M, PL) = \frac{|ax_0 + by_0 + cz_0 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \tag{4.15}$$

A expressão (4.15), acima fornece a distância entre os pontos da nuvem e o plano (PL), a qual se deve ser comparada com a tolerância τ descrita na Equação (4.8). Todos os pontos, cuja distância ao plano (PL), estiver abaixo da tolerância τ , pertencem ao conjunto CS (*Consensus Set*). Segundo Hartley e Zisserman (2003)

a qualidade e precisão do plano detectado são fortemente dependentes da tolerância escolhida e os autores argumentam que este valor pode ser calculado assumindo que o erro de medição siga uma distribuição normal.

4.3 ORIENTAÇÃO E FILTRAGEM AUTOMÁTICA

As fachadas utilizadas na pesquisa são compostas principalmente de características planas, portanto, a orientação da nuvem de pontos é alcançada usando as informações planas da fachada. O plano de orientação é calculado usando o algoritmo de RANSAC para determinar o plano principal da fachada. O ângulo Z de rotação, que é desconhecido para transformar os pontos da nuvem em um sistema orientado em relação ao plano XY é um ângulo de rotação no eixo Z.

Para determinar o ângulo Z de rotação a ser aplicado à nuvem de pontos de modo que se possa realizar a filtragem, um histograma das coordenadas em X (distância do Laser à fachada) é calculado, obtendo-se um sinal 1D ou seja de uma só variável, obtendo-se com isto o perfil da nuvem de pontos. A largura do bin¹ (intervalo de classe) do histograma é definido como sendo de $\delta = 5\text{mm}$, valor semelhante à precisão da medida de distância do LET.

Neste caso, o plano “perfeito” é um perfil orientado que tende a ser uma distribuição normal. Desta forma, a função de distribuição dos perfis dá uma ideia da posição do plano principal da fachada. Os três sistemas envolvidos: o sistema de coordenadas do LET (SOCS): o sistema de coordenadas direito (UP); e finalmente, o sistema de coordenadas orientado em relação ao plano YZ, o qual é paralelo ao plano da fachada (FIGURA 35).

Na sequência é possível observar, do lado esquerdo o histograma relativo aos dados da nuvem de pontos obtidos antes da orientação e no lado direito o histograma orientado, podendo-se verificar as diferenças entre estes dois perfis. Para exemplificar, foram utilizados os dados referentes à nuvem de pontos relativa ao Paço Quiñones de León (FIGURA 36).

¹ Em matemática, o histograma de uma variável discreta que pode adquirir diferentes valores “m” é chamada de “histograma m-bin”. Em estatística, cada dado de uma série de intervalos de valor numérico na qual os dados são classificados em análise estatística

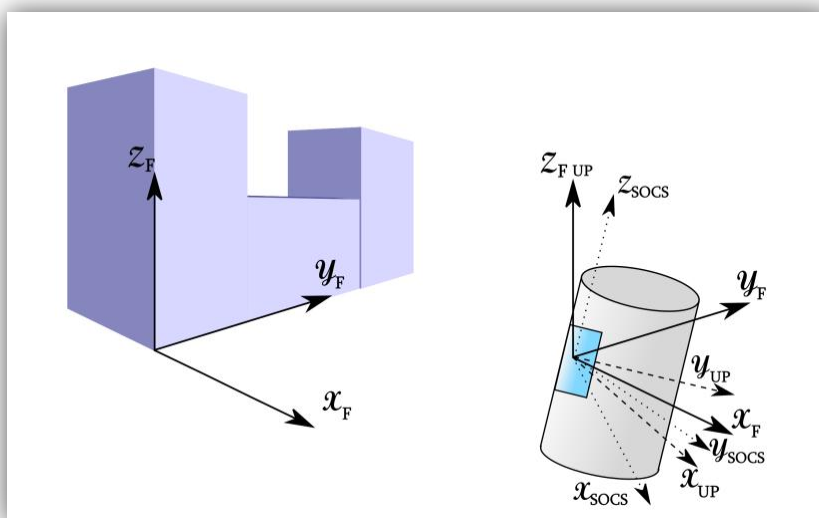


FIGURA 35 - SISTEMAS DE COORDENADAS PARA O PROCESSAMENTO DA FACHADA

FONTE: O autor (2012)

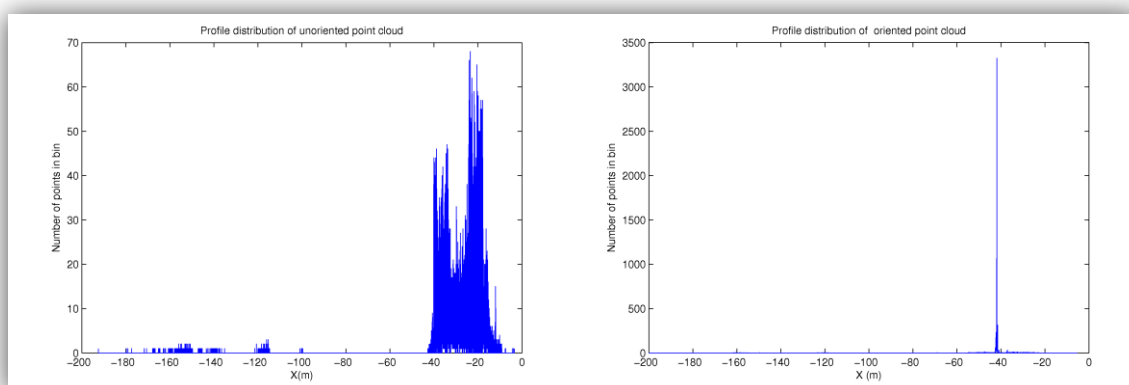


FIGURA 36 - HISTOGRAMAS DA NUVEM DE PONTOS

FONTE: O autor (2012)

Depois dos dados processados, um histograma é criado, o qual segue certo limiar predeterminado a fim de filtrar os dados. Após este limiar, somente os conjuntos de dados que contêm um grande número de dados são processados. O passo seguinte consiste na determinação do plano usando o algoritmo RANSAC. Neste sistema de coordenadas a equação do plano é simplificada. A equação (4.16) mostra esta simplificação.

$$Ax + By + C = 0$$

(4.16)

onde $(A, B, 0)$ é o vetor normal ao plano. Nesta situação a matriz de rotação R_z é dada pela seguinte equação:

$$R_z = \begin{bmatrix} \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} & \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} & 0 \\ -\frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} & \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

As coordenadas dos dados orientados são conhecidas aplicando a matriz de rotação R_z . Este processo de orientação é repetido iterativamente até que o ângulo de rotação seja menor que um limiar. Neste caso, o limiar é dado pela precisão angular dos sensores de inclinação do LET que é de $0,5^\circ$.

Depois de realizada a orientação, o próximo passo é a filtragem automática dos dados. Os dados são filtrados aplicando um filtro de profundidade em relação à coordenada X, que indica a distância do LET até o plano principal da fachada. Este filtro é adotado para a eliminação dos pontos que não pertencem à fachada.

A distância a ser aplicada depende da distância entre a estação que se encontrava o equipamento e o perfil orientado que contém o maior número de dados. Desta forma, todos os dados que não pertencem ao intervalo são eliminados, sendo que o intervalo escolhido para a eliminação dos pontos em função das características da fachada em estudo.

4.4 SEGMENTAÇÃO DA FACHADA

O processo de segmentação tem o objetivo de agrupar ou separar dados em regiões homogêneas, “planos”, e esta etapa é fundamental para obter um bom resultado no processo de extração das formas arquitetônicas de fachadas de edificações. Neste processo, também é utilizado o algoritmo de RANSAC por se tratar de uma técnica robusta e pela sua grande capacidade do reconhecimento automático das formas das entidades

geométricas, mesmo em dados que contenham ruídos. Isto pode ser comprovado em trabalhos realizados por Bauer *et al.* (2005), Schnabel *et al.* (2007), Tarsha-Kurdi *et al.* (2007), Boulaassal *et al.* (2009), dentre outros.

A segmentação dos dados de varredura Laser Escaner Terrestre usando o algoritmo de RANSAC utilizado para identificar e extrair os planos que contem as formas arquitetônicas das fachadas foi aplicado de maneira sequencial para obter todos os possíveis planos candidatos.

O resultado deste processo de segmentação levou a obtenção de uma série de planos os quais são fundamentais para a extração das formas arquitetônicas presentes nas fachadas de edificações, descrevendo desta maneira suas formas geométricas, que é o que se procura encontrar neste trabalho.

Vale ressaltar que a segmentação é um passo importante na cadeia que leva a modelagem tridimensional e que a qualidade do produto final, isto é, a extração das formas arquitetônicas e é diretamente dependente da qualidade da segmentação e da escolha de um algoritmo adequado para este processo.

4.5 EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS DAS FEIÇÕES PLANAS

No processo de segmentação foram agrupados pontos de diferentes “planos” das fachadas, determinando os segmentos. Para determinar as formas arquitetônicas existentes nas fachadas através destes segmentos, faz-se necessário extrair os pontos de contornos. Vale ressaltar que os contornos são todos os pontos da nuvem que delimitam as bordas externas ou internas de um elemento arquitetônico da fachada de um edifício.

As etapas que contemplam a extração das bordas dos segmentos planos são mostradas na sequência (FIGURA 37). O algoritmo proposto e desenvolvido neste trabalho é realizado em MatLab, calculam-se os parâmetros do plano médio de todos os pontos válidos (*inliers*), e em seguida é realizada uma triangulação de *Delaunay* para os pontos do plano médio encontrando assim os pontos de contorno.

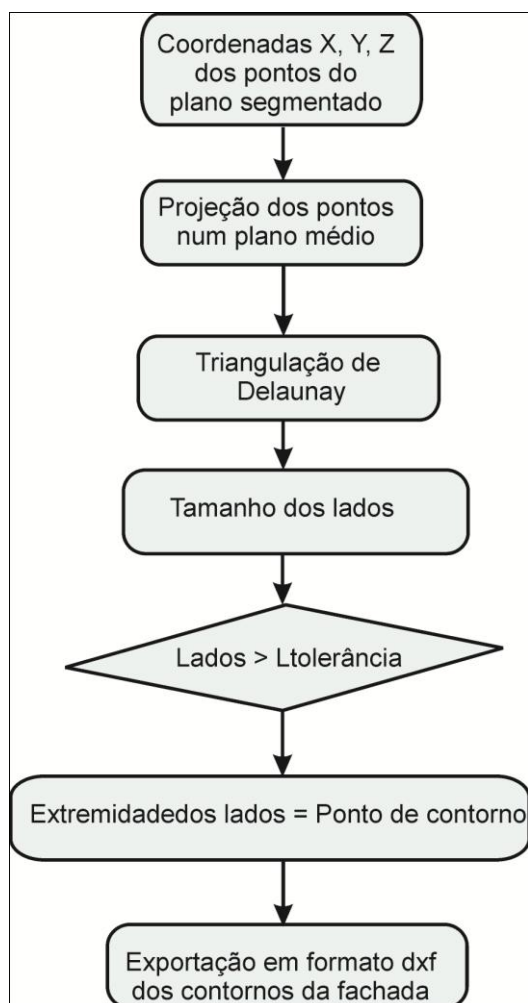


FIGURA 37 - SEQUÊNCIA DA EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA.
FONTE: O autor (2012)

4.5.1 Identificação dos pontos de contornos do segmentos

Para a extração dos contornos dos segmentos, se considera a triangulação de *Delaunay* como um gráfico, isto é, se podem considerar as relações de vizinhança entre triângulos e, conseqüentemente, as relações entre vizinhança entre as bordas, assim, o vizinho de um triângulo dado, se houver, é o triângulo que compartilha uma aresta com o primeiro triângulo dado.

Nos casos em que uma das arestas do triângulo é um limite, isto é, este triângulo está situado nas beiras da nuvem de pontos, este não fechará com outro triângulo. Desta forma, podem-se distinguir as bordas de contornos das bordas dos

outros triângulos e, portanto, podem-se identificar os pontos de um contorno. Quando se trabalha em 2D isto é relativamente fácil, no entanto os planos são pontos em 3D e as relações de vizinhança não são necessariamente adequadas ao espaço 3D.

Uma segunda solução simples adotada por Boulaassal *et al.* (2009) é considerar apenas os comprimentos das arestas dos triângulos, ou seja, os pontos dos contornos são as extremidades mais longas dos triângulos obtidos na triangulação de *Delaunay*. Assim, é possível detectar ambas as bordas, quer dizer as bordas externas que são os contornos da fachada principal e os contornos das bordas internas que são as aberturas provocadas pelas janelas ou balcões que compõem os elementos da fachada, sendo estas áreas desprovidas de pontos e localizadas dentro do plano principal (FIGURA 38).

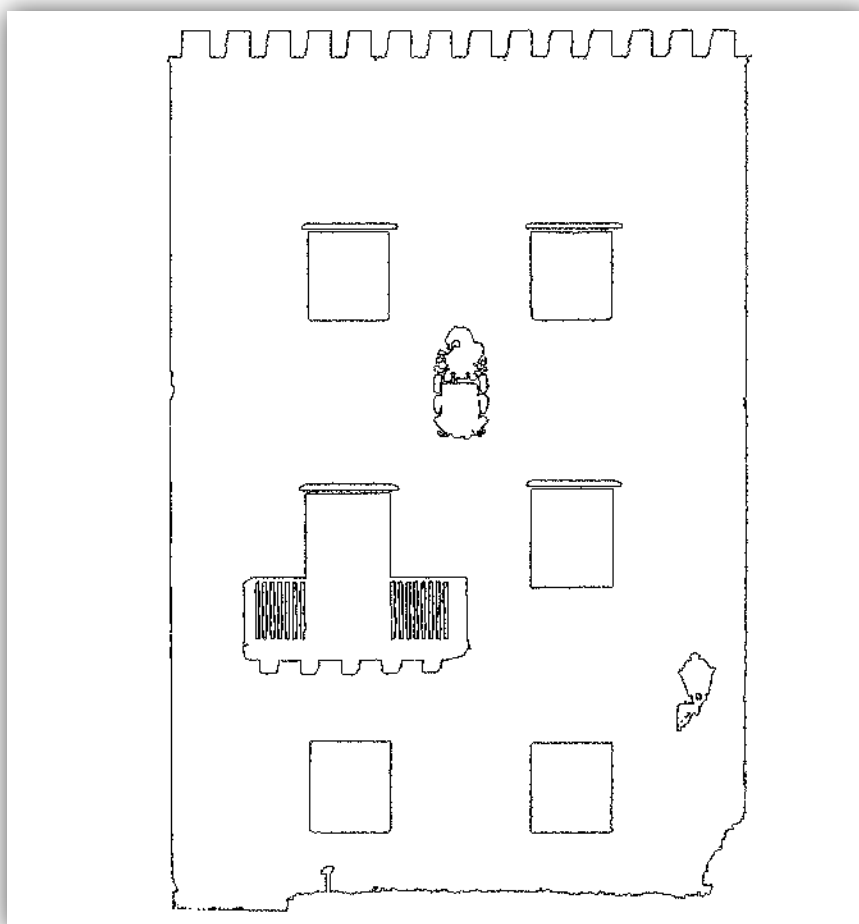


FIGURA 38 - BORDAS EXTERNAS E INTERNAS OBTIDAS POR MEIO DA TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY
FONTE: O autor (2012)

4.5.2 Vetorização dos Contornos

A partir dos pontos de bordas extraídos é necessário gerar um vetor que defina os elementos geométricos presentes nas fachadas. Para isto, as bordas são divididas em segmentos de retas baseados no critério de colinearidade. Há três categorias de segmentos de retas, os quais são classificados de acordo com sua direção: em segmentos de retas horizontais, verticais e inclinados. A rotina de ajustamento de pontos a uma reta, pelo método dos mínimos quadrados, pode ser encontrada em vários trabalhos da literatura, incluindo códigos abertos para diversas linguagens de programação. Nesta pesquisa utilizou-se as bibliotecas disponibilizadas no ambiente MatLab.

Definidos os segmentos de reta, o passo seguinte consistiu em fechar os polígonos que definem os contornos, determinando as coordenadas de seus vértices para formar as formas arquitetônicas contidas nas fachadas dos edifícios. Esta etapa também foi realizada através das bibliotecas disponibilizadas no ambiente MatLab (FIGURA 39).

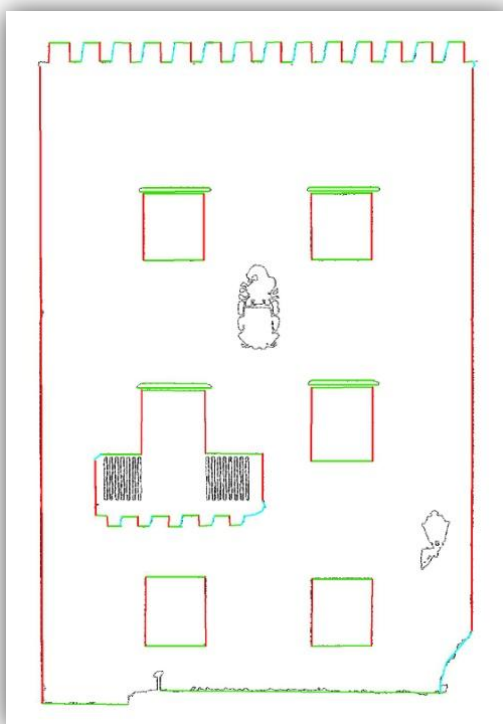


FIGURA 39 - VETORIZAÇÃO DAS BORDAS EXTERNAS E INTERNAS
FONTE: O autor (2012)

4.6 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Para avaliar a acurácia dos planos arquitetônicos extraídos e, consequentemente, as formas arquitetônicas obtidas pela metodologia mencionada anteriormente, é necessário um modelo de referência. Este modelo de referência foi obtido por meio de levantamentos topográficos convencionais de pontos das principais formas arquitetônicas das duas fachadas: Paço Quiñones de León e do Palácio Guiseppe Garibaldi, sendo realizados com a estação total TCR – 1102 da Leica, com precisão nominal melhor que a dos dois equipamentos de varredura a Laser utilizado para a aquisição dos dados.

A adoção da Topografia como método para o levantamento das formas arquitetônicas das fachadas em estudo e, consequentemente, para a geração do modelo de comparação a ser utilizado, deve-se ao conhecimento do autor neste tipo de levantamento, sua praticidade e a não necessidade de, por exemplo, uma restituição fotogramétrica, caso se tivesse optado pelo uso de Fotogrametria Terrestre.

Com base nas coordenadas dos pontos obtidos pelo levantamento topográfico realizado nas duas fachadas, foram desenhadas duas elevações, uma para o Paço Quiñones de León e outra para o Palácio Giuseppe Garibaldi no ambiente AutoCAD, onde foram calculadas as distâncias sobre a fachada de algumas das formas arquitetônicas mais relevantes que serviriam de comparação entre ambas as metodologias. Desta maneira, pode-se realizar uma análise qualitativa comparando-se as formas arquitetônicas homólogas presentes em ambas as fachadas.

Para a avaliação estatística dos resultados obtidos, interessou saber se havia diferença entre os comprimentos (distâncias) das formas arquitetônicas encontrados de forma automática (com dados Laser) e por aqueles obtidos no levantamento topográfico.

Utilizou-se o teste estatístico “teste t” para a comparação da diferença entre as médias das medidas pareadas (amostras pareadas) de dois grupos: o grupo 1 correspondeu às formas arquitetônicas obtidas com o levantamento topográfico que é a referência e o grupo 2 às formas arquitetônicas extraídas automaticamente

a partir dos dados dos levantamentos realizados como os dois equipamentos Laser Escaner Terrestre, a saber o Reigl - Z390i e o Leica HDS – 3000, testando-se a seguinte hipótese ao nível de significância de 5%.

- Não existe diferença entre os comprimentos das feições encontrados da topografia e pela extração automática de dados Laser (H_0);
- Existe diferença entre os comprimentos das feições encontrados pela topografia e pela extração automática de dados Laser (H_1).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em cada uma das etapas da metodologia proposta neste trabalho. A metodologia foi aplicada nas duas superfícies (fachadas) apresentadas anteriormente. Vale ressaltar que não se trabalhou com experimentos sintéticos, ambientes ideais, mas somente com situações reais, o que torna os experimentos mais complexos e a metodologia mais condizente com a realidade encontrada em trabalhos de documentação arquitetônica. Algumas imagens obtidas durante o processamento realizado sobre a fachada do Paço Quiñones de León foram colocadas na metodologia para ilustrar todo o processo de extração dos contornos das formas arquitetônicas das fachadas. Com relação às imagens obtidas do experimento realizado sobre a fachada do Palácio Giuseppe Garibaldi, com o objetivo de diminuir a repetitividade do processo, expõe-se apenas as imagens iniciais e finais, exceto quando relevante.

5.1 DADOS LASER

Nesta seção são apresentados os dados dos dois levantamentos realizados com Laser Escaner Terrestre, de ambas as fachadas as serem utilizados para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

5.1.1 Paço Quiñones de León

A primeira superfície arquitetônica processada foi o Paço Quiñones de León, fachada esta que tem dimensões aproximadas de 28 metros de largura e 16 metros de altura. No levantamento, utilizando o Laser Escaner Terrestre LMS – Z390i – Riegl, os dados foram obtidos com três diferentes espaçamentos lineares, a saber, uma de 100 mm, outra de 50 mm e a terceira de 10 mm. A Tabela 5 mostra algumas das características dos dados obtidos quando da varredura Laser realizada sobre a fachada do Paço Quiñones de León.

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DOS LEVANTAMENTOS – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN

Espaçamento linear aproximado	100 mm	50 mm	10 mm
Resolução angular em grados	0,135°	0,068°	0,014°
Tempo de varredura	25"	1' 42"	19' 28"
Número de pontos por varredura	57.949	236.622	5.888.344

FONTE: O autor (2012)

Na imagem obtida com os dados da varredura Laser de espaçamento com 100 mm (FIGURA 40), é possível observar que as formas arquitetônicas da fachada não estão bem definidas. Já na imagem que corresponde ao levantamento realizado com espaçamento de 50 mm (FIGURA 41) estas formas arquitetônicas são melhor identificadas do que nas de 100 mm, mas ainda não muito bem definidas, conseqüentemente o reconhecimento das formas arquitetônicas ficam difícil até mesmo por processos manuais de extração.



FIGURA 40 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 100 mm
FONTE: O autor (2012)



FIGURA 41 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 50 mm
FONTE: O autor (2012)

Já na imagem obtida com dados com o espaçamento de 10 mm entre os pontos (FIGURA 42), as formas arquitetônicas da fachada se apresentam melhor definidas, assim, o reconhecimento e a extração dos contornos são identificados com mais facilidade. Por este motivo esta foi a resolução trabalhada nos procedimentos realizados para extrair as formas arquitetônicas da fachada apresentados neste trabalho.



FIGURA 42 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 10 mm
FONTE: O autor (2012)

Isto foi comprovado quando aplicada a metodologia para os três conjuntos de dados: os melhores resultados foram encontrados, como era de se esperar, quando utilizados os dados coletados com a alta densidade de pontos, ou seja, com resolução de 10 mm, mesmo que o tempo de processamento seja maior em comparação com o tempo de processamento com os outros dois conjuntos de dados.

5.1.2 Palácio Giuseppe Garibaldi

A segunda superfície processada foi o Palácio Giuseppe Garibaldi, fachada esta com dimensões aproximadas de 23 metros de largura e 10 metros de altura. Na coleta dos dados foi utilizado o Laser Escaner Terrestre HDS – 3000 – Leica com três diferentes resoluções lineares: uma de 200 mm, outra de 100 mm e a terceira de 10 mm. A Tabela 6 mostra algumas das características dos dados obtidos quando da varredura realizada sobre uma das fachadas do Palácio Giuseppe Garibaldi.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DOS LEVANTAMENTOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI

Resolução linear aproximada	200 mm	100 mm	10 mm
Tempo de varredura	1' 25"	3' 55"	8' 38"
Número de pontos por varredura	3.630	56.232	1,141.220

FONTE: O autor (2012)

A Figura 43 apresenta a nuvem de pontos da fachada completa do Palácio Giuseppe Garibaldi com resolução de 10 mm antes de ser filtrada, que após este processo foi utilizada para a aplicação da metodologia proposta.

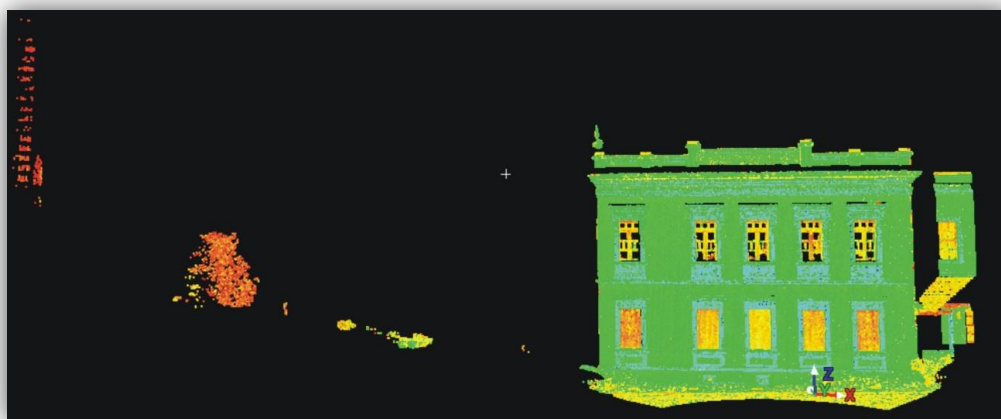


FIGURA 43 - DADOS DA VARREDURA LASER – RESOLUÇÃO DE 10 MM –
PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
FONTE: O autor (2012)

5. 2 ORIENTAÇÃO E FILTRAGEM

Com as coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) dos pontos obtidos no levantamento, iniciou-se os procedimentos de orientação e filtragem automática, aplicando o algoritmo de RANSAC. Para a orientação foi utilizado o conjunto de dados como o espaçamento de 100 mm, isto significou em um ganho de tempo de processamento e com resultados iguais se comparado quando da utilização dos dados com espaçamento de 10 mm.

Como a fachada é composta por feições planas, para a orientação da mesma foram utilizados os parâmetros definidores do plano principal da fachada. Para calcular qual o ângulo (Z) de rotação adequado, a ser utilizado, calculou-se um histograma das coordenadas X (distância do equipamento até a fachada) obtendo os perfis da nuvem de pontos um sinal 1D, ou seja, de uma só variável. A largura do *bin* (intervalo de classe) do histograma é definido como sendo de $\delta = 5\text{mm}$, porque este valor é semelhante à precisão da medida de distância do LET.

Quando a nuvem estiver orientada este histograma tenderia a ser uma distribuição Delta de Dirac. Os resultados da orientação podem ser visualizados na (FIGURA 44), a qual mostra a distribuição dos perfis dos pontos na nuvem não orientados à esquerda e a mostra direita os perfis dos pontos da nuvem orientada na cor azul. A (FIGURA 45) ilustra as nuvens de pontos, à esquerda na cor verde a nuvem não orientada e em tons de cinza a nuvem orientada.

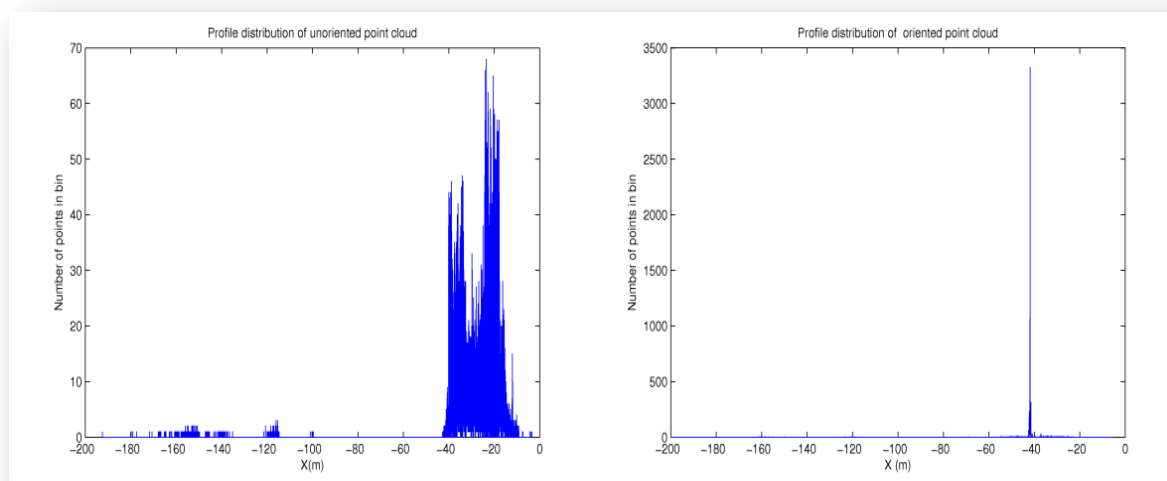


FIGURA 44 - HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO 1D DOS PONTOS DA NUVEM NÃO ORIENTADA À ESQUERDA E DA NUVEM ORIENTADA À DIREITA
 FONTE: O autor (2012)



FIGURA 45 - NUVEM NÃO ORIENTADA (VERDE) E NUVEM ORIENTADA (TONS DE CINZA)
 FONTE: O autor (2012)

Uma vez terminado o processo de orientação, o próximo procedimento consistiu na filtragem automática dos dados. Para este procedimento utilizou-se um filtro de profundidade, para eliminar todos os pontos que não pertencem à fachada. Este procedimento foi baseado nos histogramas calculados (orientado e não orientado) e a partir de o todo o conjunto de pontos da nuvem obtida do levantamento, verificou-se que o plano principal da fachada estava a uma distância aproximada de 42 metros, em relação à estação (ponto), no qual estava instalado o Laser Escaner Terrestre.

Analisando as características arquitetônicas da fachada foi definido um intervalo de ± 2 metros em relação ao plano principal da fachada para ser utilizado como intervalo na filtragem dos dados. De posse desta nova nuvem de pontos obtida (FIGURA 46) e após a filtragem dos pontos que se encontravam fora deste intervalo de dois metros da fachada principal, foi calculado um novo histograma (FIGURA 47). Vale ressaltar que o intervalo a ser escolhido para a filtragem dos dados depende das características de cada fachada, portanto não é um valor fixo que pode ser estabelecido a priori.



FIGURA 46 - NUVEM DE PONTOS APÓS A FILTRAGEM DOS DADOS – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
FONTE: O autor (2012)

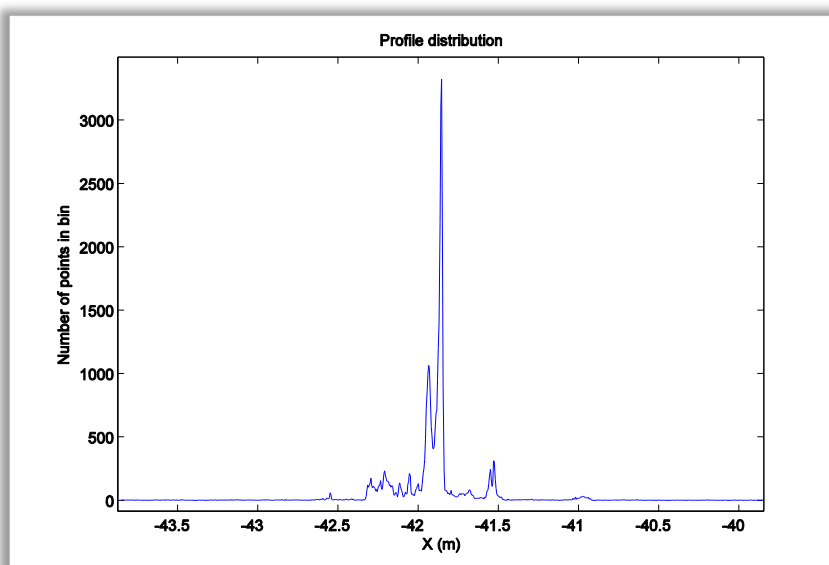


FIGURA 47 - HISTOGRAMA DA DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DA NUVEM FILTRADA
FONTE: O autor (2012)

Na sequência é mostrado o resultado da orientação e da filtragem automática realizada no Palácio Giuseppe Garibaldi (FIGURA 48). Que como resultado obteve-se o conjunto de dados, o qual foi utilizado para o procedimento de detecção dos planos (segmentação). Vale ressaltar que o intervalo utilizado para esta filtragem dos dados foi diferente daquele utilizado no Paço Quiñones de León, pois este intervalo é condicionado às características específicas de cada fachada como foi mencionado anteriormente. Neste caso, a distância utilizada em relação ao plano principal para a filtragem dos dados foi de 1m tanto a frente como atrás do plano principal da fachada.



FIGURA 48 - NUVEM DE PONTOS APÓS A FILTRAGEM DOS DADOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
FONTE: O autor (2012)

5.3 SEGMENTAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS

De posse da nuvem orientada e filtrada iniciou-se a etapa correspondente à segmentação, ou seja, detecção dos planos da fachada. Nesta etapa foi aplicado o novamente o algoritmo de RANSAC. Neste processo, diferentes planos são detectados; o número de planos detectados depende do valor de tolerância

escolhido como entrada. Este valor deve ser escolhido cuidadosamente, pois quanto menor este valor, maior o número de planos definidos.

Após alguns experimentos, verificou-se que o valor da tolerância que deveria ser usado para obter bons resultados, deveria estar num intervalo de 2 cm a 4 cm. No entanto, é necessário ressaltar que um valor de tolerância ideal só pode ser obtido de maneira empírica, o qual depende fortemente dos objetos que estão sendo investigados, das características dos dados e dos objetivos do estudo que está sendo realizado.

O resultado da segmentação apresentou os diversos planos existentes nas duas fachadas, como por exemplo, o plano que contém as duas torres do Paço Quiñones de León que se encontram no mesmo plano (FIGURA 49) e o plano que contém as janelas e a porta de sua fachada principal em um só plano (FIGURA 50).

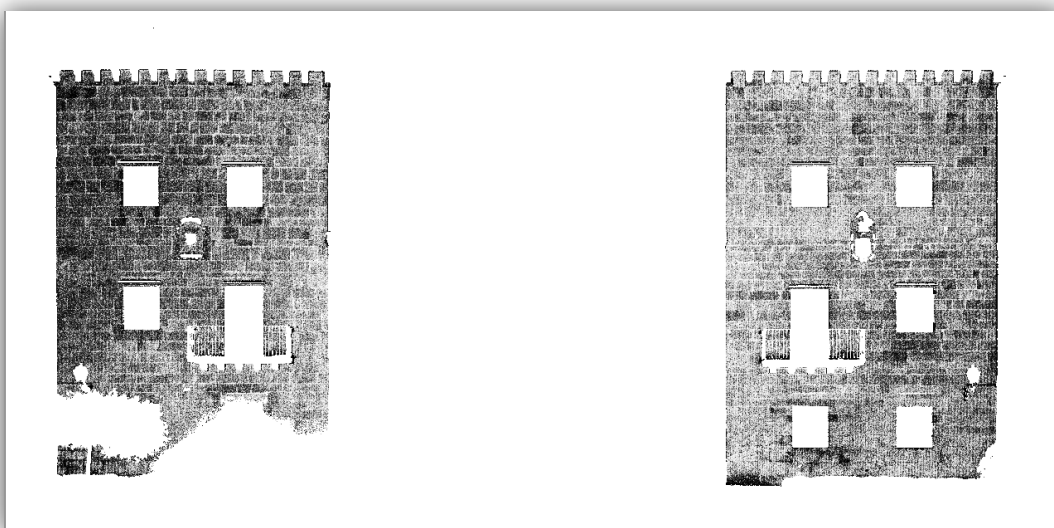


FIGURA 49 - PLANO SEGMENTADO – TORRES
FONTE: O autor (2012)

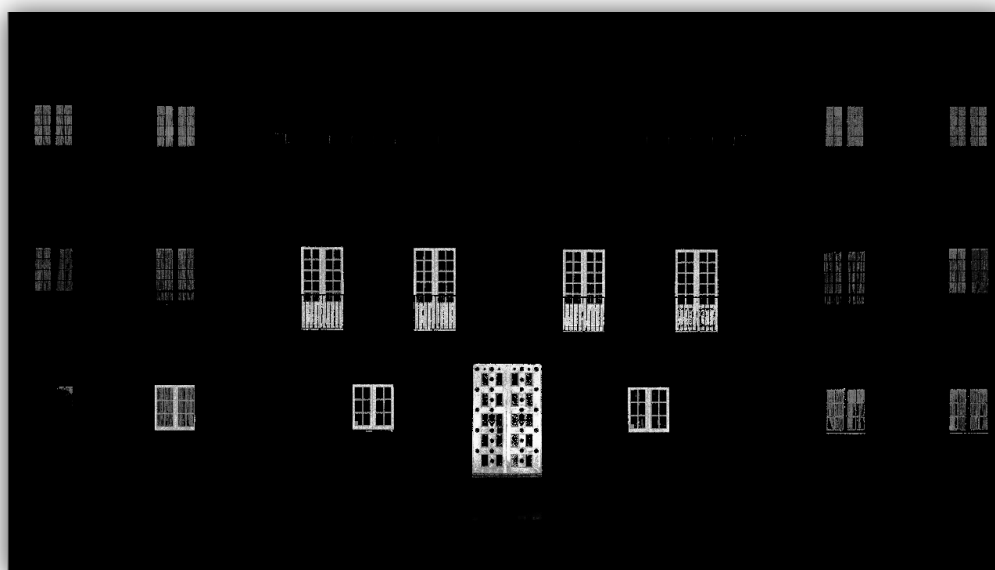


FIGURA 50 - PLANO SEGMENTADO - JANELAS E PORTA
FONTE: O autor (2012)

Para uma melhor visualização foi realizada uma composição colorida (FIGURA 51), de todos os planos detectados através da segmentação realizada, tais como: as duas torres (laranja); a parede central na cor amarela; os balcões das duas torres na cor vermelha; os balcões da parede central na cor laranja escuro; as janelas das duas torres em azul claro; as janelas da parede central na cor azul escuro as quais se encontram em planos diferentes; dentre outros na fachada.

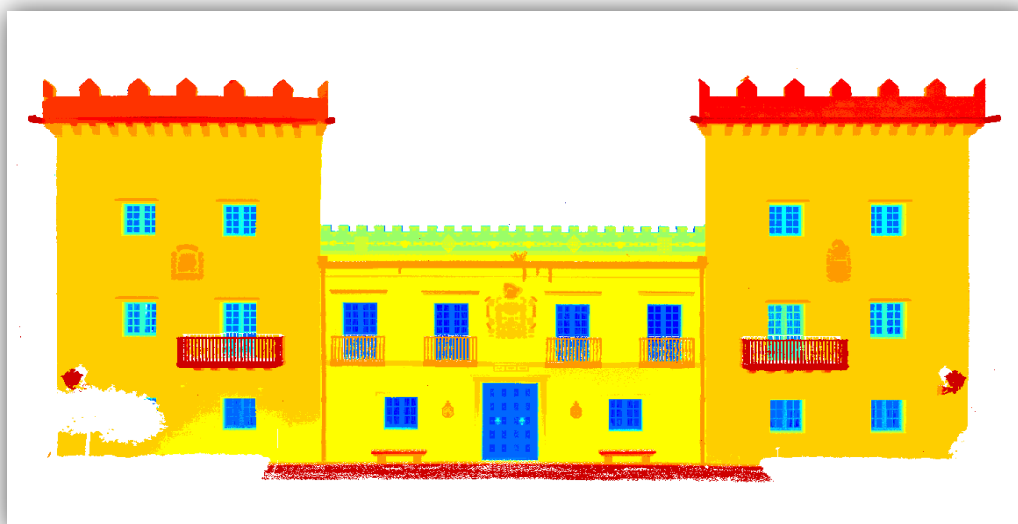


FIGURA 51 - COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PLANOS SEGMENTADOS
– QUIÑONES DE LEÓN
FONTE: O autor (2012)

Gerou-se também outra imagem (FIGURA 52) dos diferentes planos detectados ou segmentados a partir de outro ponto de vista, na qual se pode observar claramente a separação entre os planos detectados como, por exemplo, o plano da torre direita representado na cor amarela, o plano da parede central na cor vermelha, o plano do balcão da torre direita na cor branca, no qual se observa claramente a separação entre a torre e o balcão, o plano dos caixilhos das janelas da torre da direita, também em branco, os quais se encontram num plano inferior se comparado com o plano da torre, ainda na cor vermelha uma parte da parede central e na cor branca uma das luminárias e um dos brasões na parte central da torre.

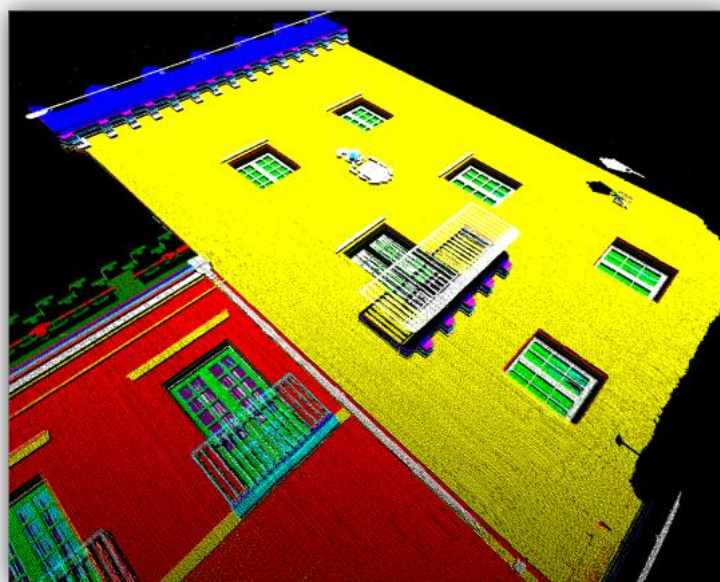


FIGURA 52 - COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PLANOS SEGMENTADOS A PARTIR DE OUTRO PONTO DE VISTA

FONTE: O autor (2012)

Com o objetivo de ilustrar melhor o resultado da segmentação fez-se um recorte na fachada mostrando os pequenos detalhes que ornamentam a parte superior da parede central do Paço Quiñones de León (FIGURA 53). Observa-se na parte superior da figura uma fotografia desta ornamentação e abaixo os planos segmentados destes ornamentos. Na cor branca a parede e sobre ela as cadeias na cor vermelha, que faz parte desta ornamentação.

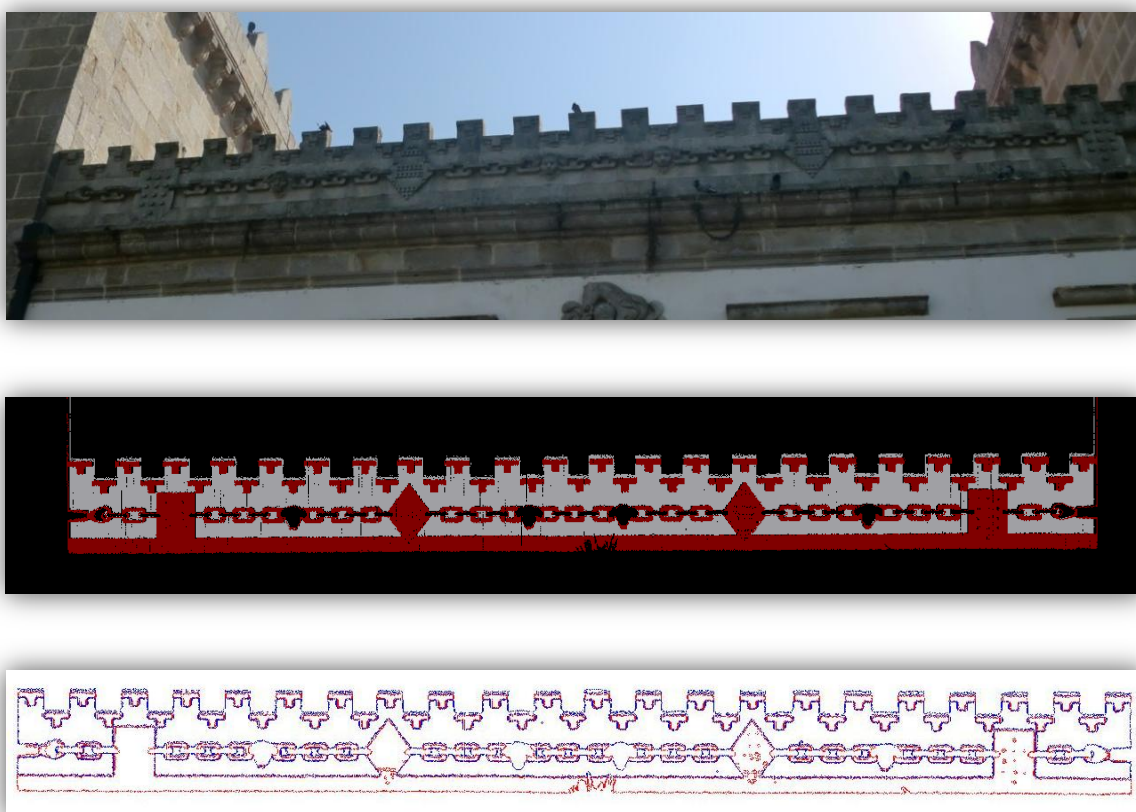


FIGURA 53 - ORNAMENTOS DA PAREDE CENTRAL
FONTE: O autor (2012)

O mesmo procedimento foi aplicado ao Palácio Giuseppe Garibaldi para a detecção dos planos. O resultado apresenta distintos planos e para ilustrar este processo, apresenta-se o plano segmentado que contém a parede principal (FIGURA 54). Na sequência foram extraídos os demais planos contendo as outras formas arquitetônicas de interesse.

Com o intuito de ilustrar melhor o resultado da segmentação foi realizada uma composição colorida (falsa cor) da mesma forma para o Paço Quiñones de León e assim poder diferenciar os diversos planos, na cor amarela a parede principal, e azul os ornamentos da fachada e em vermelho as venezianas das janelas inferiores como também os caixilhos das janelas (FIGURA 55).

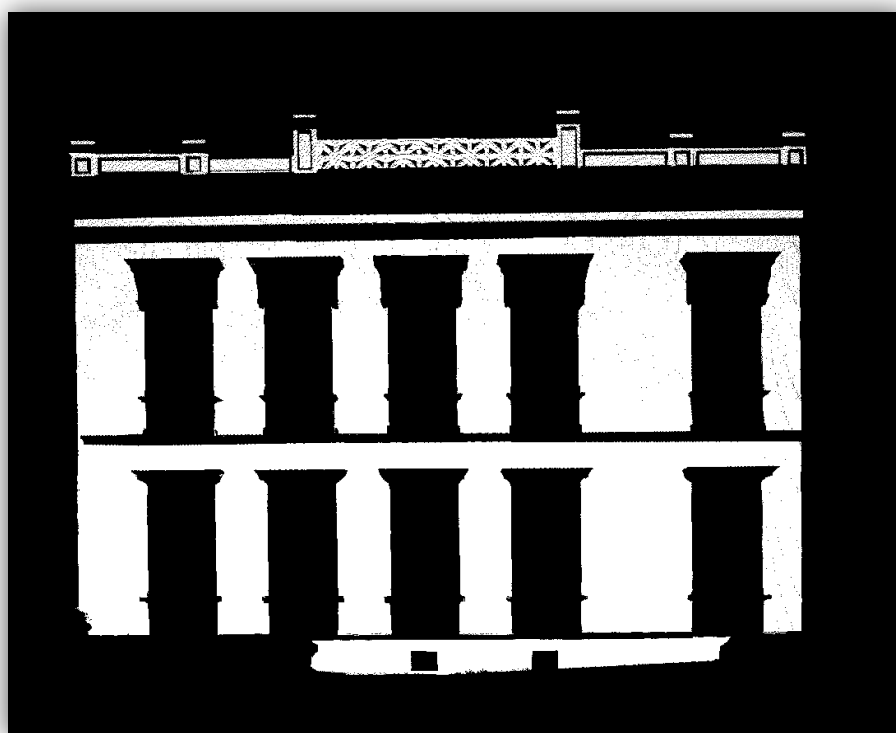


FIGURA 54 - PLANO SEGMENTADO – PAREDE PRINCIPAL
– PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
FONTE: O autor (2012)



FIGURA 55 - COMPOSIÇÃO COLORIDA DOS PLANOS
SEGMENTADOS – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
FONTE: O autor (2012)

5.4 DELIMITAÇÃO DOS CONTORNOS DAS FORMAS ARQUITETÔNICAS

O próximo procedimento automático implementado neste trabalho (em ambiente MatLab) corresponde à delimitação dos contornos das formas arquitetônicas da fachada. Para cada plano segmentado foi realizado um processamento relativo à delimitação dos seus contornos, cuja sequência é mostrada no fluxograma (FIGURA 56) que consistiu em projetar os pontos de cada plano (Paralelepípedo) encontrado num plano médio para que se possa trabalhar com a triangulação de *Delaunay* em 2D. Com base nesta triangulação é possível determinar os pontos de contornos baseados nas dimensões das arestas destes triângulos.

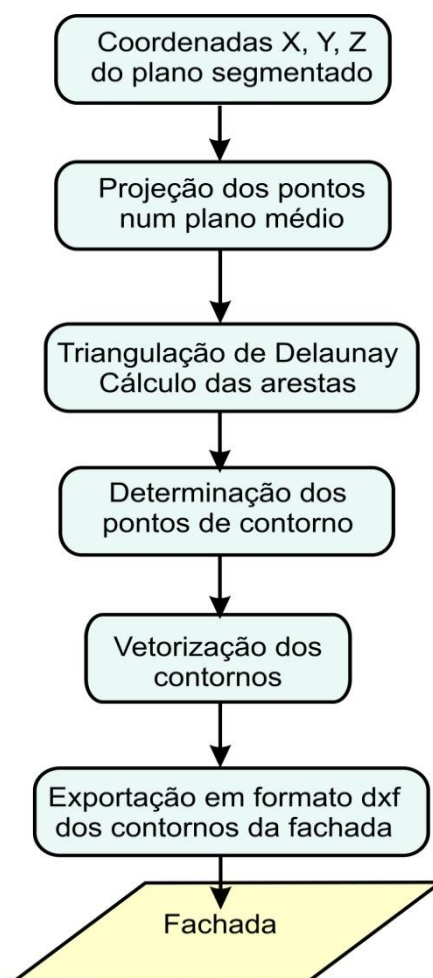


FIGURA 56 - SEQUÊNCIA DA EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS
FONTE: O autor (2012)

Para exemplificar este procedimento as Figuras 57, 58 e 59 apresentam, respectivamente, as triangulações de *Delaunay* realizadas, sobre o plano que contém as janelas e a porta da fachada, sobre o plano que contém as duas torres e sobre o plano que contém a parede central do Paço Quiñones de León. Este procedimento também foi realizado para cada um dos planos obtidos na segmentação da fachada do Palácio Garibaldi trabalhado na pesquisa.

Observa-se na Figura 57 que os triângulos obtidos pela triangulação de *Delaunay* estão representados em azul e os pontos das arestas encontradas estão representados em vermelho. Isto nos leva a verificar que o algoritmo foi capaz de identificar os pontos que representam as formas arquitetônicas, tanto externas como as internas (janelas e porta) da fachada do edifício. Os quais podem ser melhor observados nas Figuras 58 e 59.

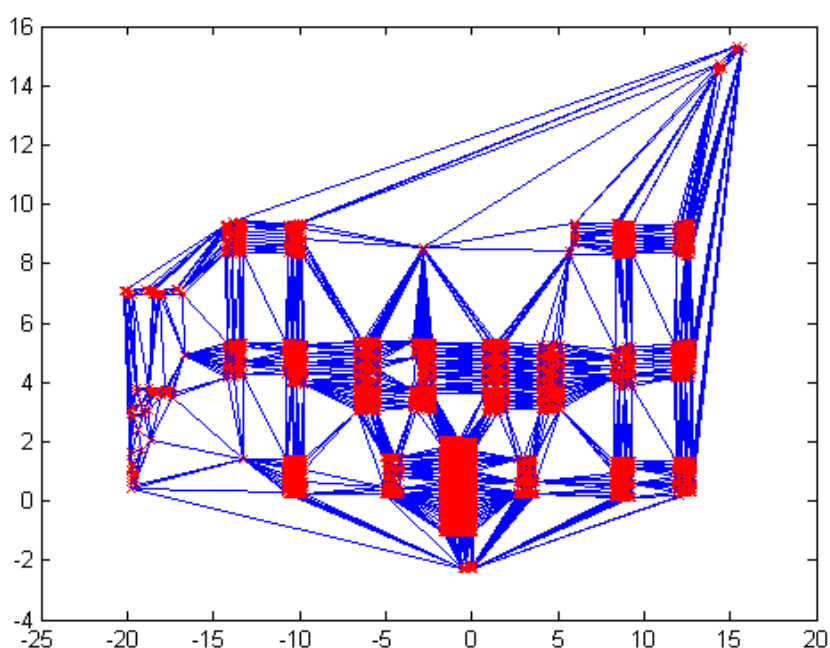


FIGURA 57 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY - PLANO DAS
JANELAS E DA PORTA DA FACHADA
FONTE: O autor (2012)

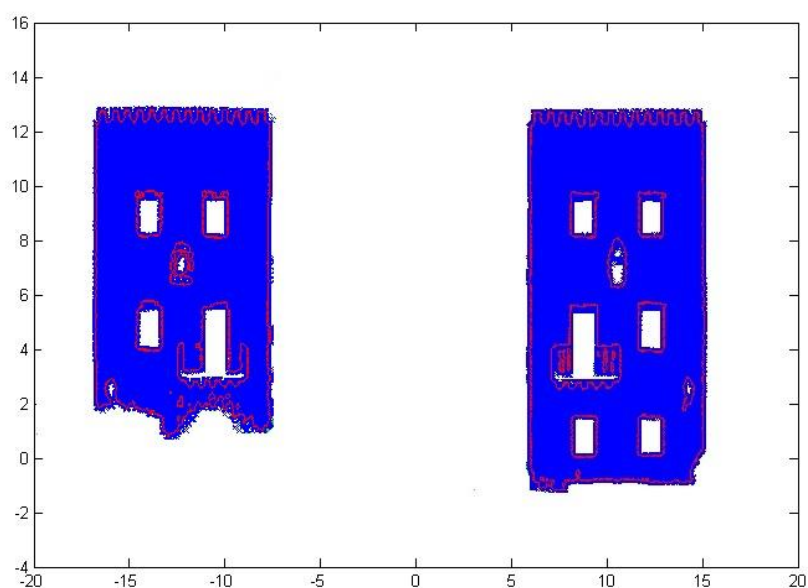


FIGURA 58 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY - TORRES DA FACHADA

FONTE: O autor (2012)

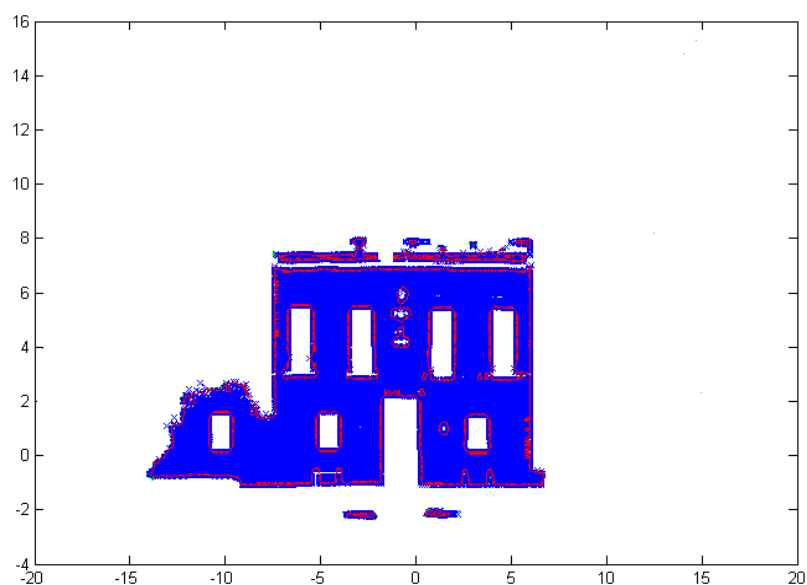


FIGURA 59 - TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY – PAREDE CENTRAL DA FACHADA

FONTE: O autor (2012)

Com base na triangulação de *Delaunay* foram extraídas as coordenadas dos pontos que delimitam as formas arquitetônicas das fachadas. O resultado obtido neste procedimento (FIGURA 60) para o plano que contém as torres do Paço Quiñones de León, onde as coordenadas dos pontos de contorno estão representadas na cor amarela e o resultado deste mesmo procedimento para o

plano que contém a parede central, representando em amarelo os pontos de contorno (FIGURA 61). Este procedimento foi realizado para cada um dos planos das duas fachadas que contém as formas arquitetônicas. Aqui são apresentadas somente as triangulações de *Delaunay* para o Paço Quiñones de León para diminuir a repetitividade de imagens.

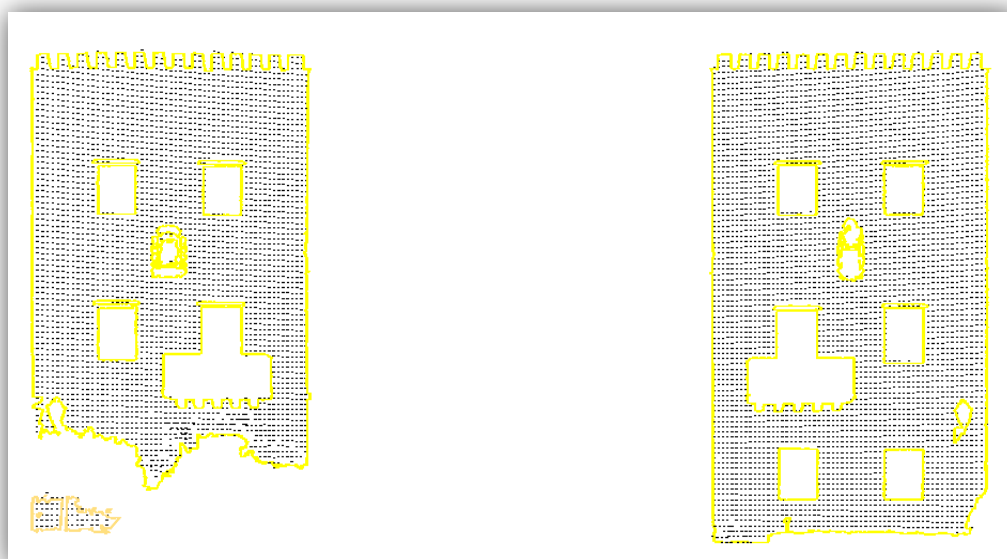


FIGURA 60 - PONTOS DE CONTORNO - DAS TORRES
FONTE: O autor (2012)

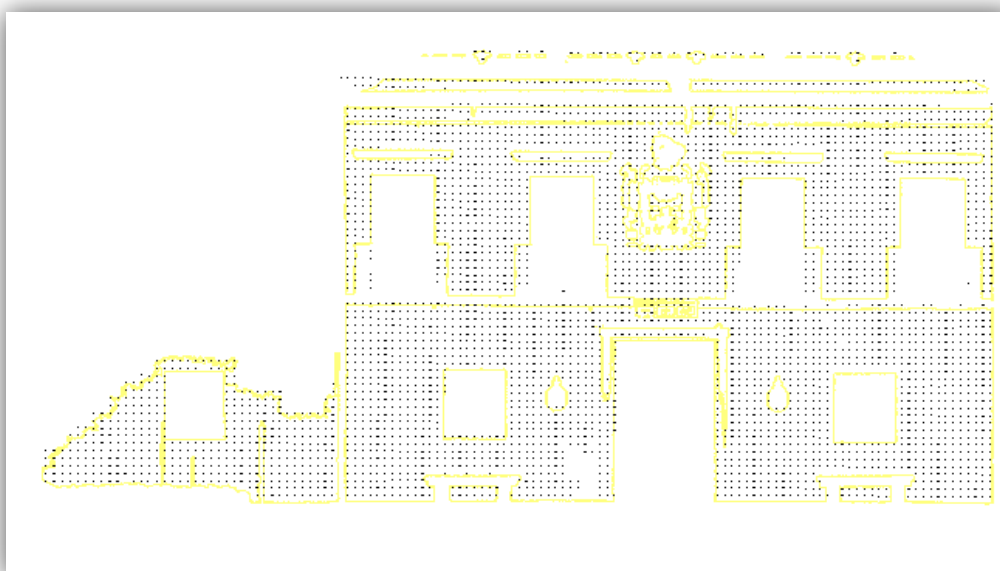


FIGURA 61 - PONTOS DE CONTORNO - PAREDE CENTRAL
FONTE: O autor (2012)

5.5 VETORIZAÇÃO DOS CONTORNOS

Esta etapa consistiu em ajustar segmentos de retas (horizontais, verticais e inclinados) a partir dos pontos de contorno definidos na etapa anterior e encontrar as interseções entre elas, definindo assim os vértices dos polígonos que definem os contornos das formas arquitetônicas das fachadas.

Na representação a seguir (FIGURA 62), da torre direita do Paço Quiñones de León se verifica os três tipos de segmentos de retas encontrados nesta fachada, a saber: as retas horizontais em verde, as retas verticais em vermelho e as retas inclinadas em azul e os respectivos vértices das intersecções encontradas entre as diferentes retas, os quais estão representados na cor amarela. As retas foram ajustadas a partir dos pontos de contorno que estão representados em preto nesta figura. Na sequência (FIGURA 63) fez-se um recorte da parte superior da torre direita do Paço Quiñones de León para ilustrar melhor os três tipos de retas.

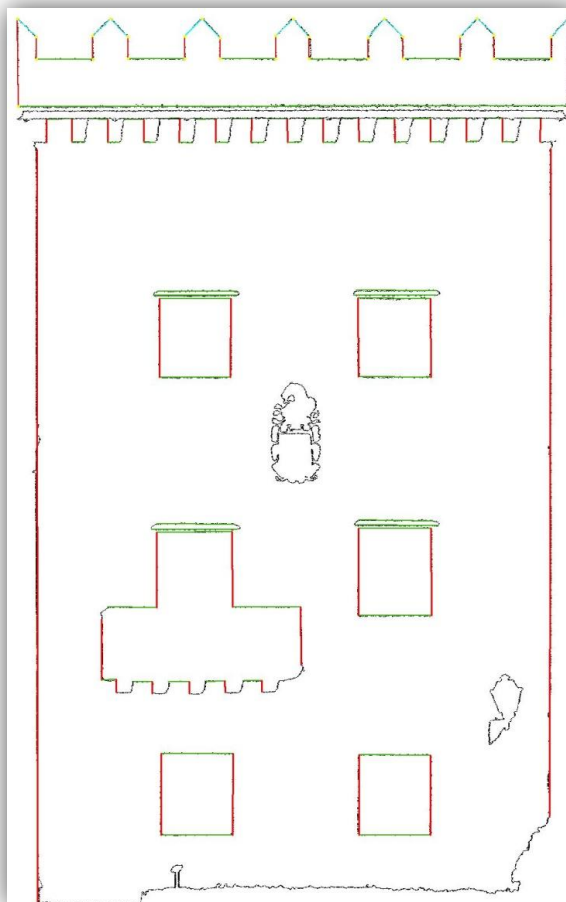


FIGURA 62 - VETORIZAÇÃO DOS CONTORNOS
FONTE: O autor (2012)

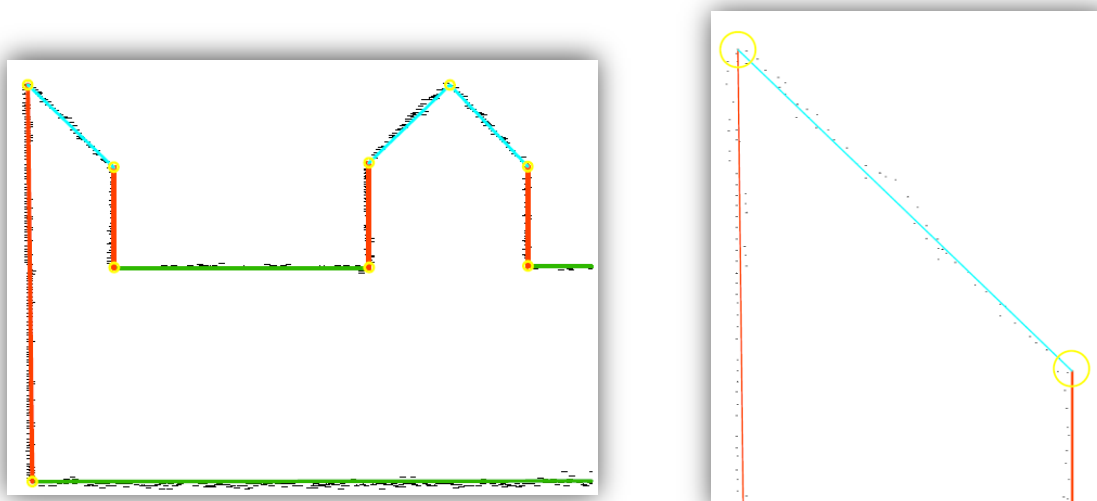


FIGURA 63 - DETALHE DA VETORIZAÇÃO DOS CONTORNOS
 FONTE: O autor (2012)

Uma vez terminada a fase de vetorização dos contornos das formas arquitetônicas das fachadas, estes foram agrupados em diferentes níveis (layers) e exportados para o formato DXF (*Drawing Exchange Format*) para serem trabalhados no AutoCAD.

Abaixo (FIGURA 64) é apresentada uma composição colorida dos vários níveis que foram extraídos da fachada do Paço Quiñones de León e na sequência (FIGURA 65) a mesma composição com suas respectivas cotas obtida no AutoCAD.



FIGURA 64 - EXTRAÇÃO DOS CONTORNOS DAS FORMAS ARQUITETÔNICAS
 FONTE: O autor (2012)

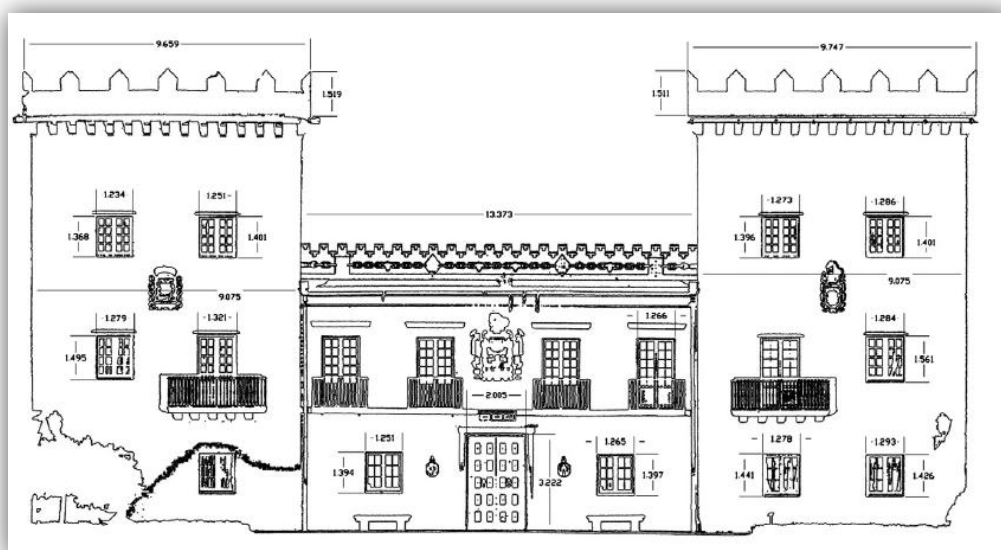


FIGURA 65 - FACHADA COTADA – QUIÑONES DE LEÓN
 FONTE: O autor (2012)

A representação das formas arquitetônicas principais do Palácio Giuseppe Garibaldi (FIGURA 66) foi obtida após a composição realizada em AutoCad, contendo a parede principal, os caixilhos das janelas e os ornamentos das mesmas. Detalhes das janelas (inferiores e superiores) são mostrados na sequência (FIGURA 67).

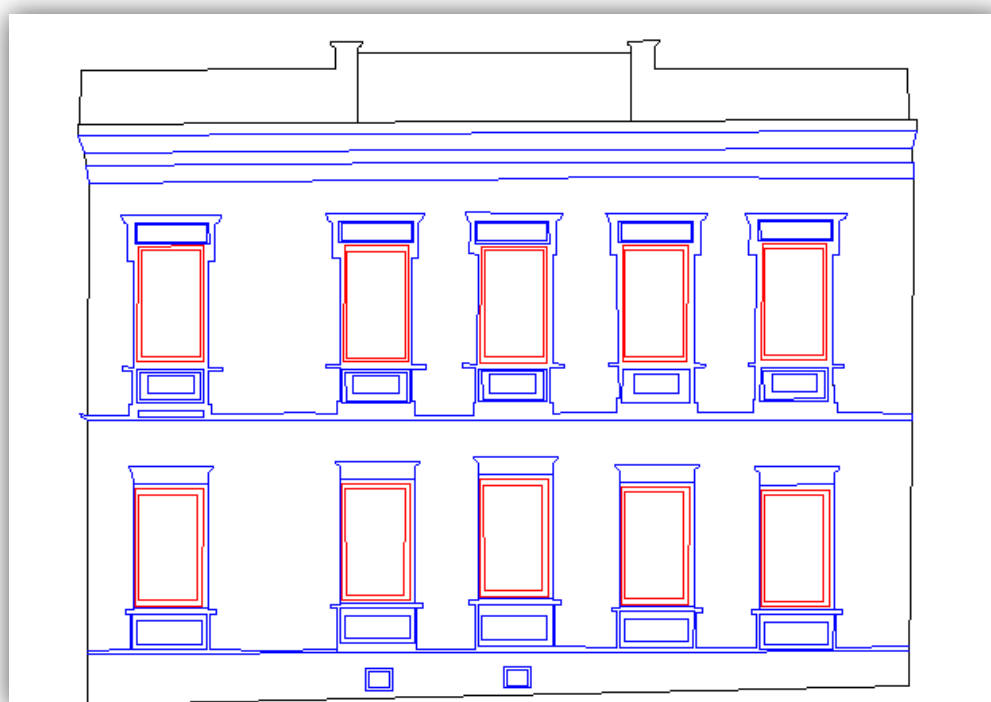
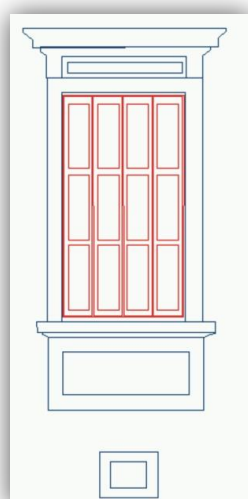
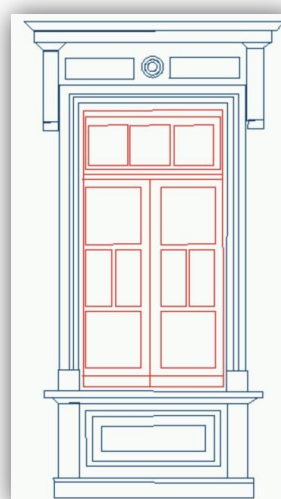


FIGURA 66 - FACHADA – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
 FONTE: O autor (2012)



a)



b)

FIGURA 67 - JANELAS – PALÁCIO GIUSEPPE
 a) INFERIOR b)
 SUPERIOR
 FONTE: O autor (2012)

5.6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de avaliar a metodologia proposta foram realizados levantamentos topografia sobre ambas as fachadas. Com o intuito de determinar dimensões a serem comparadas em ambos os procedimentos, extração das formas geométricas com dados Laser Escaner Terrestre e os dados obtidos pelo levantamento topográfico.

5.6.1. Avaliação dos levantamentos do Paço Quiñones de León

Para a avaliação dos resultados obtidos na extração automática das formas arquitetônicas através dos dados dos levantamentos por Laser Escaner Terrestre, foram realizados levantamentos topográficos sobre as duas fachadas utilizando a estação total Leica TCR 1102. O levantamento sobre a fachada do Paço Quiñones de León consistiu de 282 pontos dos elementos mais significativos (FIGURA 68), das torres e da parede central, como também das janelas e da porta, para que pudesse ser realizada uma comparação quantitativa destes elementos. Após os cálculos necessários, as formas arquitetônicas principais foram desenhadas, utilizando o software AutoCAD, e indicadas suas dimensões (FIGURA 69).



FIGURA 68 - PONTOS DA FACHADA OBTIDOS POR LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
FONTE: O autor (2012)

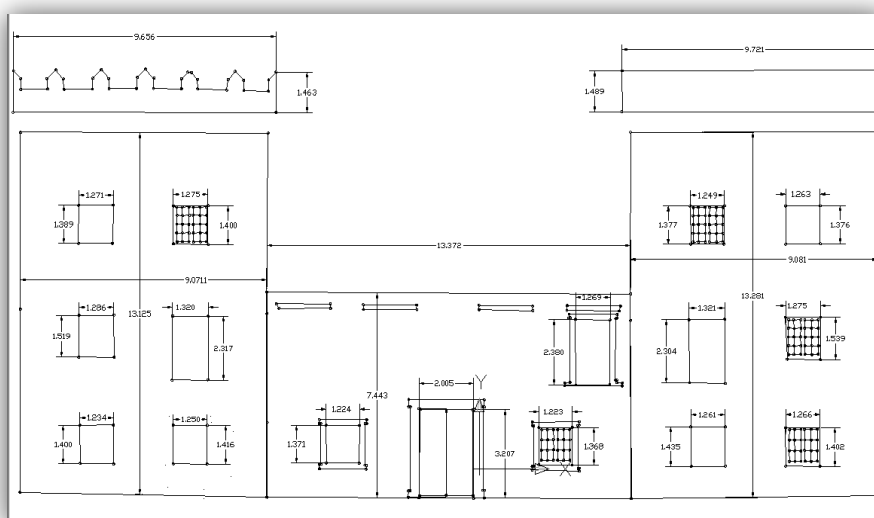


FIGURA 69 - REPRESENTAÇÃO DA FACHADA OBTIDA POR LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN

FONTE: O autor (2012)

Os resultados obtidos nos dois levantamentos realizados no Paço Quiñones de León são sobrepostos e apresentados a seguir (FIGURA 70): levantamento de dados com a estação total e levantamento de dados com o Laser Escaner Terrestre. Nesta sobreposição, realizada no software AutoCAD, pôde-se efetuar uma análise visual dos resultados. Em vermelho é apresentado o resultado do levantamento topográfico e, em azul, o resultado do levantamento à Laser após a extração das formas arquitetônicas por meio da metodologia desenvolvida.

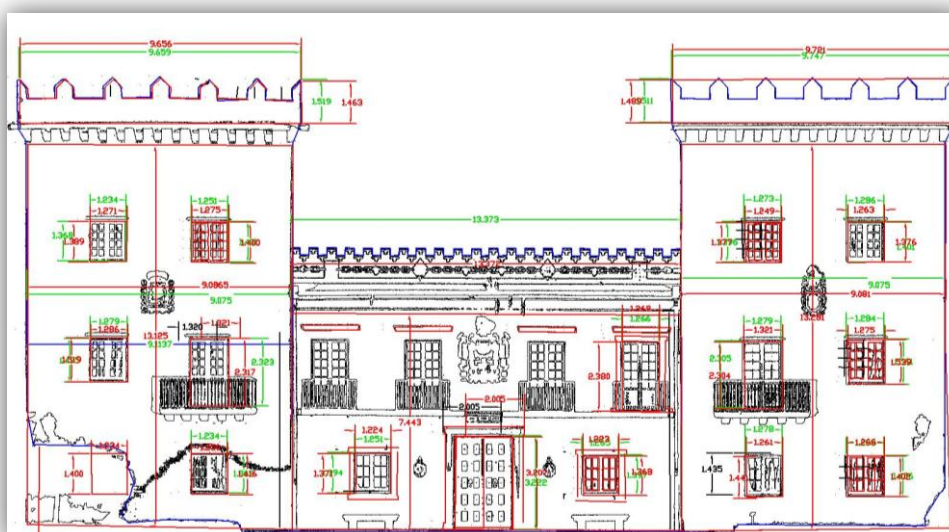


FIGURA 70 - SOBREPOSIÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES DA FACHADA

FONTE: O autor (2012)

Para uma análise visual mais detalhada, foi realizado um recorte da torre direita do Paço Quiñones de León com o intuito de mostrar a diferença entre os dois levantamentos. Foram realizadas as medidas de alguns elementos da torre direita para mostrar as diferenças. No detalhe da torre (FIGURA 71), obtido por recorte é possível observar as diferenças entre os dois levantamentos, diferenças essas que variaram de 0,016 a 0,025 m, ou seja, inferiores aos 2,5 cm.

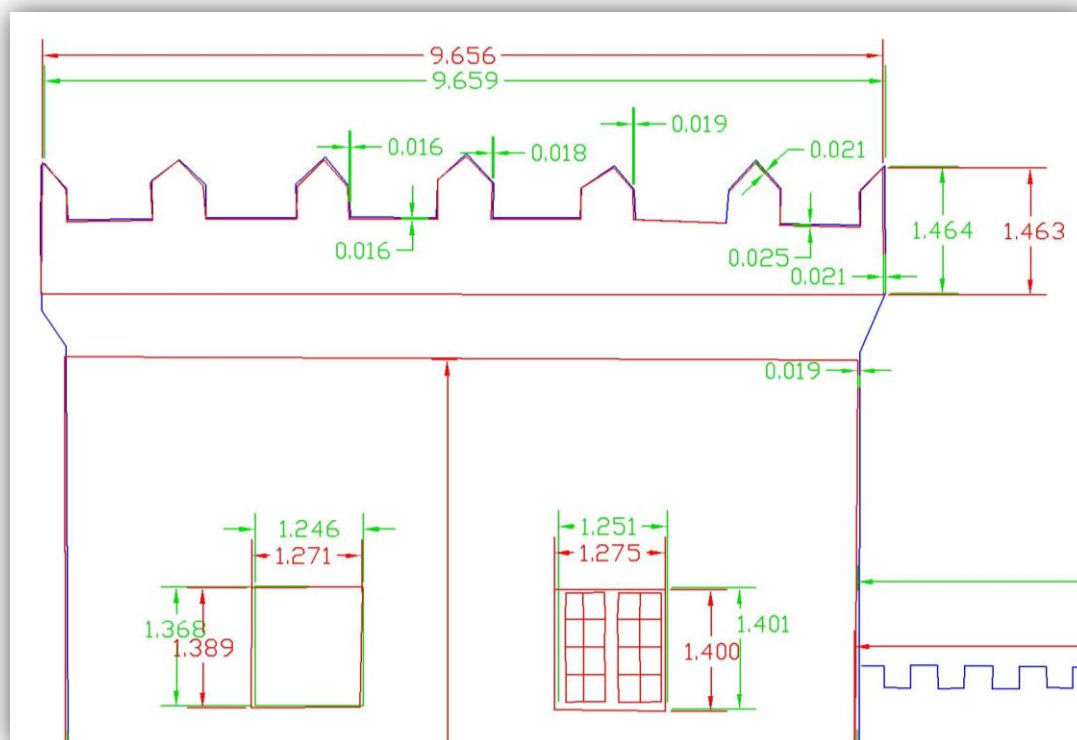


FIGURA 71 - DETALHE DA SOBREPOSIÇÃO DOS LEVANTAMENTOS
FONTE: O autor (2012)

A seguir (FIGURA 72) é apresentado um recorte da nuvem de pontos, em escala de cinza, da janela superior (a) do Paço Quiñones de León; (b) a segmentação correspondente; (c) a extração dos seus contornos; e (d) o resultado do levantamento topográfico indicando os valores correspondentes de largura e altura, os quais foram depois comparados com o intuito de realizar uma análise quantitativa do levantamento.

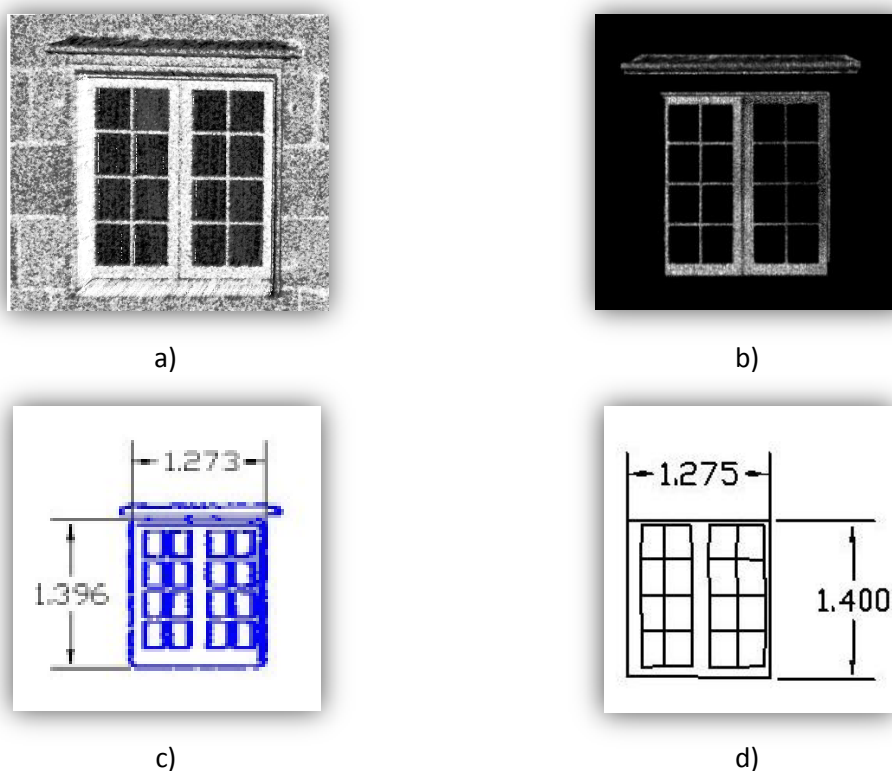


FIGURA 72 - JANELA SUPERIOR – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
 a) NUVEM DE PONTOS b) SEGMENTAÇÃO
 c) CONTORNOS d) LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO
 FONTE: O autor (2012)

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os valores das comparações das dimensões das janelas, porta e das duas torres do Paço Quiñones de León. As janelas foram classificadas em janela superior, central e inferior. Para cada tipo de janela foram realizadas as respectivas medidas e calculada a sua média; esta média será comparada com a média obtida no levantamento topográfico.

Nesta comparação se pôde verificar que há uma diferença máxima de 0,010 m quando comparadas as médias. Se esta comparação for realizada individualmente a diferença pode chegar a 0,020 m. No que diz respeito à comparação entre as medidas das duas torres pode-se verificar que há uma diferença máxima de 0,073 m quando comparada a largura e de um máximo de 0,115 m, quando comparadas as suas alturas.

TABELA 7 - MEDIDAS DAS LARGURAS E ALTURAS DAS JANELAS – LEVANTAMENTOS LASER E TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN

	Janela Superior		Janela Central		Janela Inferior	
	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)
Laser	1,264	1,368	1,279	1,495	---	----
	1,251	1,401	1,321	2,323	1,234	1,362
	1,278	1,396	1,284	1,561	1,278	1,441
	1,266	1,401	1,279	2,305	1,284	1,426
Média	1,261	1,392	1,291	1,528	1,265	1,410
Topografia	1,271	1,389	1,286	1,519	1,284	1,400
	1,275	1,400	1,320	2,317	1,250	1,416
	1,249	1,377	1,275	1,539	1,261	1,435
	1,286	1,376	1,321	2,304	1,266	1,402
Média	1,270	1,386	1,301	1,529	1,265	1,413
Dif. entre as médias	-0,009	0,006	0,010	-0,001	0,000	-0,003

FONTE: O autor (2012)

TABELA 8 - MEDIDAS DAS LARGURAS E ALTURAS DA PORTA E DAS DUAS TORRES – LEVANTAMENTOS LASER E TOPOGRÁFICO – PAÇO QUIÑONES DE LEÓN

	Porta		Torre Esquerda		Torre Direita	
	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)
Laser	2,005	3,222	9,149	13,230	9,049	13,201
			9,141		9,049	
Média	2,005	3,222	9,145	13,230	9,049	13,201
Topografia	2,005	3,207	9,071	13,125	9,081	13,281
			9,073		9,083	
Média	2,005	3,207	9,072	13,125	9,083	13,281
Dif. entre as médias	0,000	0,015	0,073	0,115	0,034	0,080

FONTE: O autor (2012)

Uma vez efetuada a comparação entre os dados do levantamento topográfico e os dados do levantamento por LET, procedeu-se a análise dos resultados obtidos desta comparação. Tais resultados são, no entanto, em função da comparação realizada entre as dimensões homólogas das formas arquitetônicas da fachada.

A apresentação das diferenças encontradas durante a etapa de comparação dos dois conjuntos de dimensões do levantamento topográfico e levantamento por LET é mostrada em forma de tabelas, permitindo desta forma a visualização dos resultados de forma rápida e eficiente. Os valores das dimensões das formas arquitetônicas selecionadas (topografia e LET) foram armazenados em uma planilha e as estatísticas computadas utilizando-se o *software* Microsoft Excel.

Os valores das diferenças bem como os valores de todas as estatísticas computadas do teste *t* para amostras pareadas estão presentes na Tabela 9.

TABELA 9 - TESTE t PARA COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DE DADOS EMPARELHADOS.

	Diferenças (cm)				Média (cm)	Desvio (cm)	Estatística
Janela Sup.	0,7	2,4	2,9	2,0	2,0	0,94	1,25
Janela Meio	0,7	0,1	0,9	2,2	1,0	0,88	0,55
Janela Inf.	2,4	0,6	2,2	0,1	1,3	1,14	0,58

FONTE: O autor (2012)

Como todos os valores de t calculados são menores $|t| < t_{\alpha/2} = 3,182$, aceita-se a hipótese inicial H_0 , ou seja, não existe diferença significativa entre as distâncias obtidas com o levantamento topográfico e com o levantamento por LET no nível de significância de 5%. Então a precisão da detecção pode ser definida como o desvio padrão dos valores das distâncias (largura e altura). Neste estudo, a precisão da extração dos segmentos de retas foi de $\pm 2,5$ centímetros.

5.6.2. Avaliação dos levantamentos do Palácio Giuseppe Garibaldi

Para a avaliação dos resultados obtidos na extração automática das formas arquitetônicas através do Laser Escaner Terrestre da fachada do Palácio Giuseppe Garibaldi, foi realizado também um levantamento topográfico utilizando uma estação total Leica TCR 1102. Este levantamento consistiu da determinação de 214 pontos sobre a fachada dos elementos mais significativos tais como a largura e alturas da parede principal, como também das janelas inferiores e superiores, para que se possa realizar uma comparação quantitativa destes elementos. O resultado deste levantamento (FIGURA 73) foi representado no AutoCAD indicando as dimensões (altura e largura) da fachada.

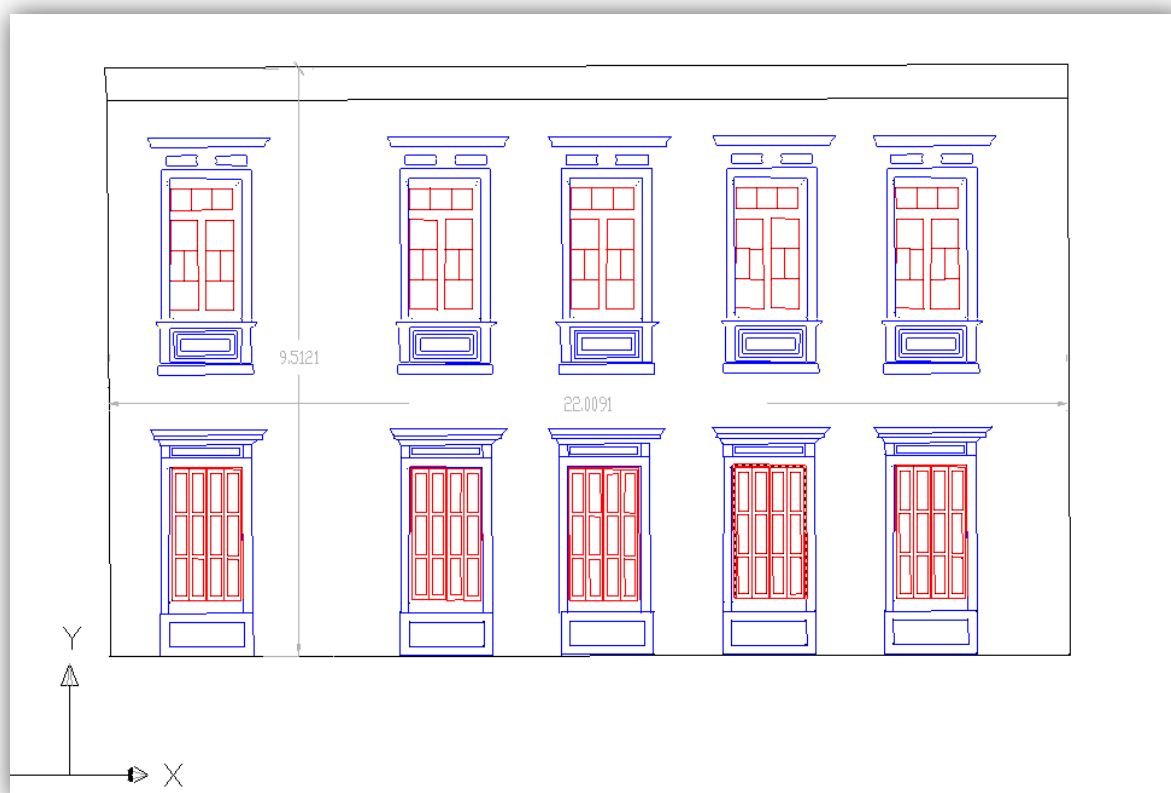


FIGURA 73 - REPRESENTAÇÃO DA FACHADA OBTIDA POR LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI
 FONTE: O autor (2012)

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os valores das dimensões das janelas superiores e inferiores e das dimensões referentes à largura e altura da fachada do Palácio Garibaldi obtidos pelos levantamentos LET e Topográfico, assim como as discrepâncias entre eles. Na comparação das dimensões das janelas verificou-se uma diferença máxima de 2,3 cm nos resultados obtidos pelos dois levantamentos, quando comparadas as médias das observações obtidas nas larguras das janelas superiores. Se esta comparação for realizada individualmente isto é, janela a janela, a diferença pode chegar aos 2,5 cm destacado em cinza na Tabela 10.

TABELA 10 - MEDIDAS DAS LARGURAS E ALTURAS DAS JANELAS – LEVANTAMENTOS LET E TOPOGRÁFICO – PALÁCIO GIUSEPPE GARIBALDI

	Janela Superior		Janela Inferior	
	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)
Laser	1,487	2,478	1,529	2,357
	1,482	2,472	1,535	2,359
	1,485	2,481	1,529	2,351
	1,482	2,471	1,536	2,355
	1,485	2,473	1,525	2,348
Média	1,484	2,475	1,531	2,354
Topografia	1,462	2,477	1,509	2,363
	1,458	2,472	1,512	2,360
	1,468	2,468	1,515	2,359
	1,459	2,465	1,519	2,365
	1,460	2,470	1,515	2,357
Média	1,461	2,470	1,514	2,361
Diferença	-0,023	0,005	0,017	0,007

FONTE: O autor (2012)

TABELA 11 - COMPARAÇÃO DAS LARGURAS E ALTURAS DAS DUAS TORRES NOS LEVANTAMENTOS REALIZADOS COM LASER E TOPOGRAFIA.

	Fachada	
	Largura (m)	Altura (m)
Laser	22,005	8,974
	22,015	8,963
Média	22,010	8,968
Topografia	22,085	8,997
	22,023	8,995
Média	22,054	8,996
Diferença	0,044	0,028

FONTE: O autor (2012)

Da mesma forma que a comparação realizada no Paço Quiñones de León os valores das dimensões das formas arquitetônicas selecionadas (topografia e LET) foram armazenados em uma planilha e as estatísticas computadas utilizando-se o *software* Microsoft Excel. Os valores das diferenças do Palácio Giuseppe Garibaldi, bem como os valores de todas as estatísticas computadas, encontram-se presentes na Tabela 12.

TABELA 12 - TESTE *t* PARA COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DE DADOS EMPARELHADOS.

	Diferenças (cm)					Média	Desvio	Estatística
Janela Sup.	2,5	2,4	1,7	2,3	2,5	2,3	1,1	0,05
Janela Inf.	2,0	2,3	1,4	1,7	1,0	1,6	0,9	0,04

FONTE: O autor (2012)

Como todos os $|t| < t_{\alpha/2} = 2,776$ calculados, aceitou-se a hipótese inicial H_0 , ou seja, não existe diferença significativa entre as distâncias obtidas com o levantamento topográfico e como o levantamento por LET ao nível de significância de 5%. De acordo com Docci e Maestri (2008) estas diferenças seriam quase imperceptíveis nas escalas arquitetônicas de 1: 100 e 1: 50 onde o erro de graficismo estaria no intervalo de 1 a 3 cm (Anexo 4).

5.7 DELIMITAÇÃO DOS CONTORNOS DE OUTRAS FORMAS ARQUITETÔNICAS

Para verificar se a metodologia proposta neste trabalho atenderia a outras formas arquitetônicas não geométricas (quadradas ou retangulares) aplicou-se esta metodologia a três figuras que se encontravam na fachada do Paço Quiñones de León, a saber, os brasões (círculo amarelo) que estão localizados nas duas torres e na parede central deste monumento (FIGURA 74).

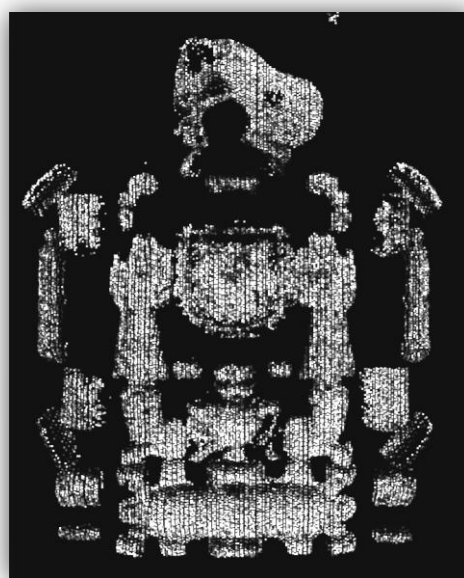


FIGURA 74 - TRÊS BRASÕES DA FACHADA PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
FONTE: O autor (2012)

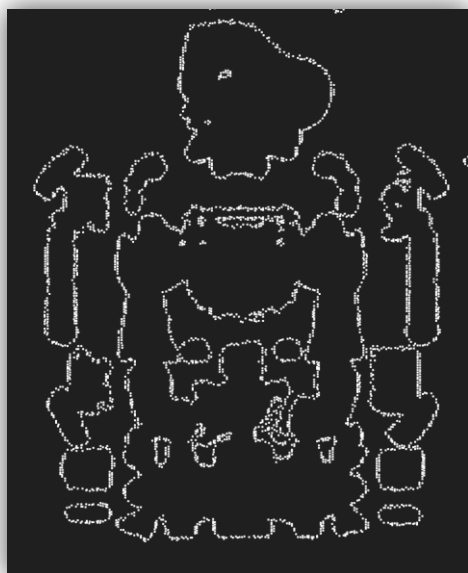
Na sequência mostra-se uma fotografia do brasão central do Paço Quiñones de León (a), seguido de um plano que contém os pontos segmentados após a aplicação do algoritmo de RANSAC (b), os pontos de contornos que descrevem as formas principais do brasão (c) e uma composição das feições encontradas neste brasão (d) (FIGURA 75).



(a)



(b)



(c)



(d)

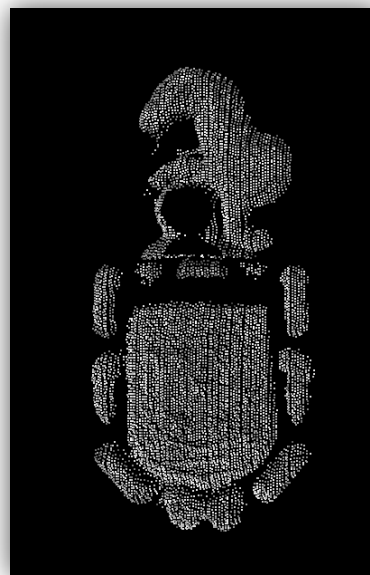
FIGURA 75 - BRASÃO DA PAREDE CENTRAL DO PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
a) FOTOGRAFIA; b) NUVEM SEGMENTADA; c) CONTOPO
PRINCIPAL; d) COMPOSIÇÃO DOS CONTORNOS

FONTE: O autor (2012)

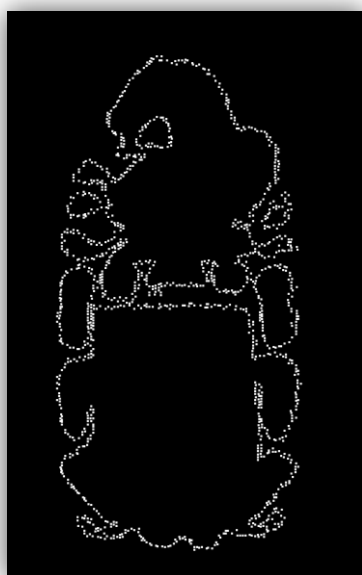
Adotamos o mesmo procedimento para detectar os contornos dos brasões das duas torres. O resultado para o brasão da torre da direita é apresentado abaixo (FIGURA 76), sendo: (a) a fotografia do brasão, (b) a nuvem de pontos segmentada; (c) o contorno principal e (d) uma composição dos contornos obtidos.



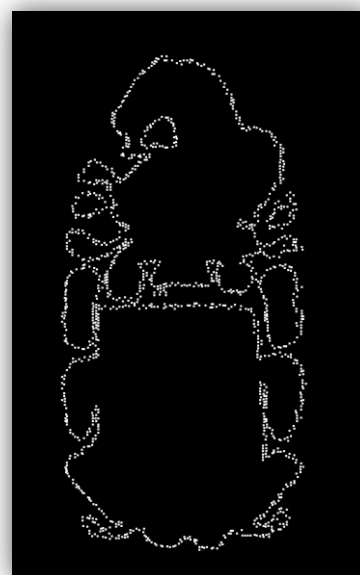
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 76 - BRASÃO DA TORRE DIREITA DO PAÇO QUIÑONES DE LEÓN
a) FOTOGRAFIA; b) NUVEM SEGMENTADA; c) CONTORNO PRINCIPAL; d) COMPOSIÇÃO DOS CONTORNOS
FONTE: O autor (2012)

O resultado obtido para o brasão da torre da esquerda é apresentado a seguir (FIGURA 76); fotografia do brasão da torre da esquerda (a); a nuvem de pontos segmentada (b); o contorno principal (c) e em uma composição dos contornos obtidos (d).

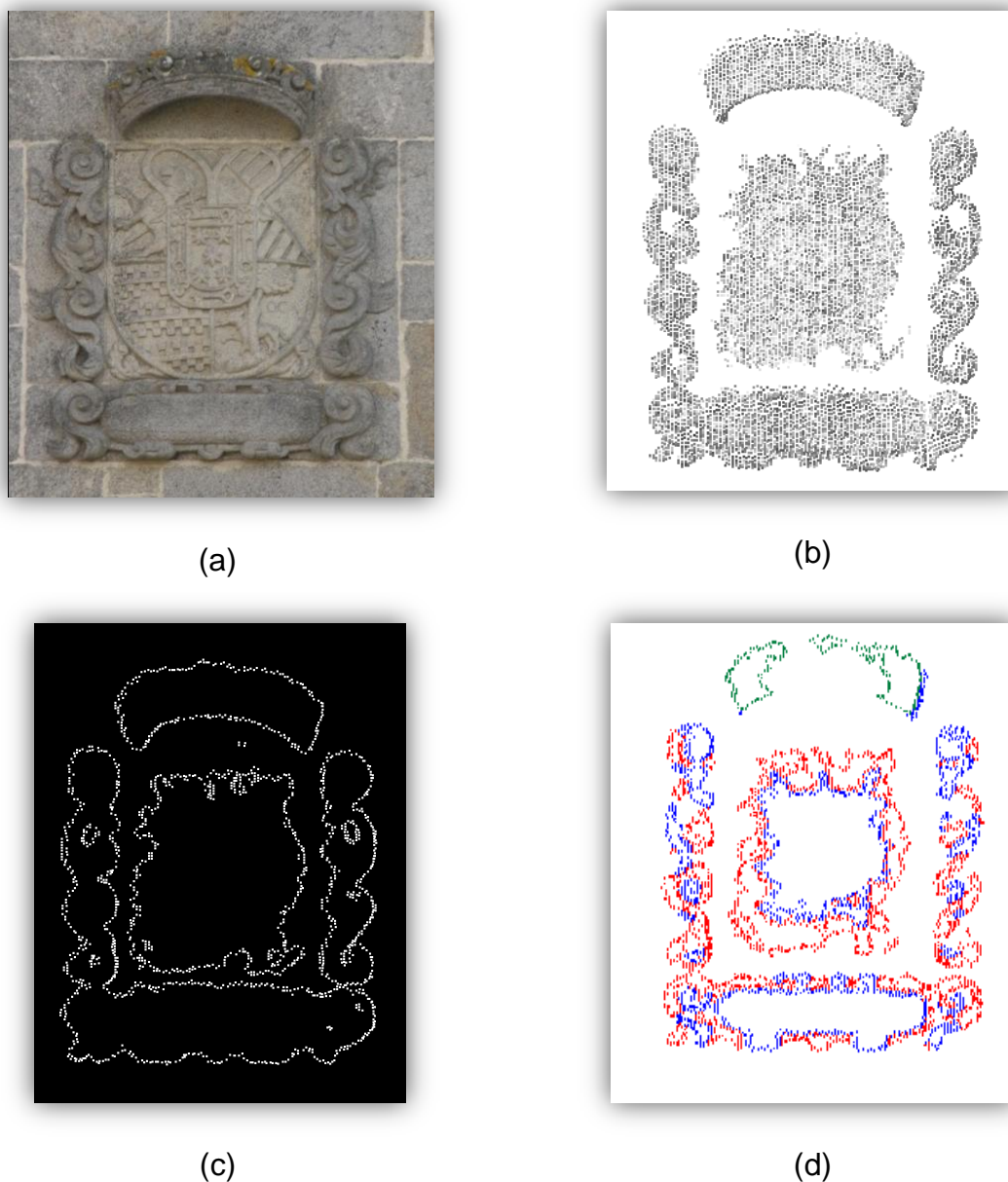


FIGURA 77 - BRASÃO DA TORRE ESQUERDA DO PAÇO QUIÑONES DE LEÓN.
 a) FOTOGRAFIA; b) NUVEM SEGMENTADA; c) CONTOURO PRINCIPAL; d) COMPOSIÇÃO DOS CONTORNOS
 FONTE: O autor (2012)

Verificando visualmente os contornos detectados e apresentados nas Figuras 75, 76 e 77, podem ser percebidas as principais formas arquitetônicas dos três brasões. Isto nos leva a concluir que a metodologia, se aprimorada, pode ser

aplicada também a figuras que não obedeçam a certa geometria, como é o caso destes três exemplos.

Na Figura 77, onde é apresentado o brasão da torre esquerda, tornam-se visíveis as falhas quando da junção de todos os contornos encontrados, isto se deve ao fato da distância entre os planos segmentados ser muito pequena, aproximadamente de 1 cm. O que nos leva a concluir que a qualidade da representação dos contornos é dependente da distância entre planos a serem segmentados.

Segundo Machado (2006) estes contornos podem ser transformados em imagens (pixels) e assim utilizar o algoritmo de perseguição de contornos de varredura radial para o traçado dos contornos das feições, delineando os respectivos polígonos. Ao executar este algoritmo de perseguição de contorno, memoriza-se a cada pixel e as suas coordenadas, gerando como produto diversas listas de coordenadas dos pixels, sendo que cada lista constitui um polígono. Ainda Machado (2006) menciona ainda que estes algoritmos podem ser encontrados em diversos livros de processamento de imagens, citando como exemplo Pavlidis (1982) que trata de algoritmos de processamento de gráficos e imagens.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O levantamento das formas arquitetônicas constitui um dos elementos indispensáveis para a documentação e preservação de monumentos e sítios históricos. Devido à importância da documentação das formas arquitetônicas urbanas é sempre interessante sua pesquisa, o estudo e consequentemente a experimentação de novas técnicas de levantamento na busca de solucionar, ou ainda minimizar as limitações encontradas e porque não dizer nos problemas dos levantamentos com técnicas tradicionais.

Este trabalho discutiu sobre a extração automática de contornos das características de fachadas arquitetônicas a partir de dados de varredura de Laser Escaner Terrestre. As pesquisas encontradas na literatura científica centram-se na extração automática de feições, buscando-se com isto uma equiparação com os procedimentos manuais. Buscou-se, nesta pesquisa em particular, à automação de todos os procedimentos inerentes à extração de feições, propostos sem a intervenção humana. O trabalho foi baseado em algoritmos conhecidos pela comunidade científica da área de Ciências Geodésicas, os quais permitem sua fácil assimilação e consequente disseminação.

Os experimentos realizados foram bem sucedidos, o que comprova que a metodologia proposta é capaz de extrair automaticamente as formas das características das fachadas de edificações, gerando desta forma as elevações necessárias para a documentação das formas arquitetônicas de edificações de interesse patrimonial, ou seja, a documentação gráfica da construção.

Outra vantagem observada nos experimentos é a capacidade de detecção das linhas (retas) que descrevem as características dos contornos das edificações que é muito importante nos trabalhos de reconstrução tridimensional das fachadas de edificações, tópico de grande interesse à comunidade científica do campo das intervenções arquitetônicas de monumentos históricos.

Os procedimentos propostos na metodologia apresentaram um grande potencial na delimitação de formas arquitetônicas, sendo infundável a gama de experimentos que se pode realizar. O algoritmo de RANSAC demonstrou ter capacidade de reconhecimento e identificação dos planos que descrevem as superfícies das fachadas.

O filtro utilizado na pesquisa, embasado na profundidade, mostrou ter uma boa habilidade para a filtragem automática de dados LET, sendo capaz de eliminar os elementos que não fazem parte das fachadas arquitetônicas, gerando assim um novo arquivo de dados contendo apenas informações relativas às características da edificação.

A qualidade das elevações elaboradas por meio do emprego da varredura por Laser Escaner Terrestre ficou comprovada, quando se compara as dimensões extraídas pelo LET com os valores das dimensões obtidas por Topografia, pois as diferenças computadas, segundo o teste estatístico aplicado (t de student) são desprezíveis para a escala proposta. E mais ainda quando for considerado o erro de grafismo (1 a 3 cm) encontrado na representação da elevação, que segundo Docci e Maestri (2008) são compatíveis às escalas de projeto 1: 100 ou 1: 50.

Desta forma, o principal objetivo proposto pela pesquisa foi atendido e, como resposta, pode-se afirmar que os resultados da extração das formas arquitetônicas a partir de dados provenientes de Laser Escaner Terrestre atendem à qualidade requerida nos levantamentos arquitetônicos preconizados pelos documentos relacionados à preservação e documentação do patrimônio, dos quais podemos citar como exemplo, a Carta de Veneza, que constitui um dos principais documentos sobre o assunto.

É importante destacar que o bom desenvolvimento deste trabalho, pioneiro no Brasil, só foi possível pela adequação da metodologia do trabalho e da escolha correta do tipo de algoritmo. Foi possível verificar a grande capacidade de automatizar esse tipo de levantamento, principalmente na etapa de escritório, que é a que consome mais tempo de processamento, valorizando assim a contribuição do presente trabalho.

Finalmente, espera-se, através deste trabalho, a incorporação da tecnologia de varredura por Laser Escaner Terrestre e o uso de toda sua potencialidade na produção da “documentação técnica precisa” de modelos geométricos tridimensionais, desenhos e elevações, com fins de cadastramento de edificações e de alimentação das bases de dados para Sistemas de Informação Geográfica de edificações e sítios arqueológicos e históricos com relevância cultural no Brasil.

Para a continuidade nos estudos do tema aqui tratado e melhoria dos resultados, seguem algumas recomendações são importantes a serem feitas.

Sugere-se:

- Aplicar a metodologia proposta em outros tipos de fachadas que contenham outras formas arquitetônicas, não se restringindo a superfícies planas, por exemplo, superfícies cilíndricas ou cônicas, para verificar a viabilidade da mesma;
- Aplicar esta metodologia para o levantamento completo de um monumento e não se restringindo somente de uma fachada, possibilitando a geração de um modelo tridimensional, não apenas como uma nuvem de pontos tridimensional, mas com as feições lineares fielmente representadas;
- A integração de outros dados obtidos nos levantamentos realizados com Laser Escaner Terrestre, tais como a informação da intensidade, pois esta é uma opção interessante para auxiliar o processo de extração das formas arquitetônicas;
- Realizar outras comparações com a metodologia proposta para avaliação da qualidade das formas arquitetônicas extraídas, usando-se, por exemplo, a Fotogrametria Terrestre;
- Além dos dados tridimensionais (X, Y, Z) e dos valores de intensidade gerados pelo Laser Escaner Terrestre, sugere-se adicionar outras fontes de dados advindos de outros levantamentos, como, por exemplo, de levantamentos fotográficos;
- Utilizar o algoritmo de perseguição de contornos por varredura radial para a detecção dos contornos das formas arquitetônicas que não obedecem a determinada geometria, que é o caso dos brasões da fachada do Paço Quiñones de León.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, A. L., CHUDAK, D. . Patrimônio Histórico Digital: documentação do Pelourinho - Salvador, Bahia, Brasil, com tecnologia 3D laser scanning. In: SIGRADI 2005 - IX Congresso Ibero-americano de Gráfica Digital. Visão e Visualização. Lima - Peru: SIGRADI, 2005.
- AXELSSON, P. Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications. ISPRS Journals of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999.
- BALTSAVIAS, E. A Comparison Between Photogrammetry and Laser Scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, Issues 2–3, July, pp. 83–94, 1999.
- BALZANI, M; PELLEGRINELLI, A; PERFETTI, N; UCCELLI, F. A terrestrial 3D laser scanning: Accuracy test. Proceeding of the International Symposium CIPA 2001.
- BAUER, A., PAAR, G., KALTENBOCK, A. Mass Movement Monitoring Using Terrestrial Laser Scanner for Rock Fall Management. Geo-information for Disaster Management, Springer, Berlin, 393–406, 2005.
- BELTON, D, LICHTI, D. D. Classification and Segmentation of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds using Local Variance Information. ISPRS Journals of Photogrammetry and Remote Sensing. Comission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology, 2006.
- BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBS, A. The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording. CIPA – International Symposium, Proceedings. Potsdam, Germany – 2001.
- BOEHLER, W., BORDAS-VINCENT, M., MARBS, A. Investigating laser scanner accuracy. I3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology. FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany. 2004.
- BOEHLER, W., MARBS, A. Investigating Laser Scanner Accuracy. <http://scanning.fh-mainz.de/scannertest/results300305.pdf>. Acesso em 10/04/2009.
- BOEHLER, W., MARBS, A. 3D Scanning Instruments. Proceeding of de CIPA WG6. International Workshop on scanning for cultural heritage recording. 2002.
- BÖHLER, W., e HEINZ, G. Documentation, Surveying, Photogrammetry. Anais do XVII Simpósio do Comitê Internacional de Fotogrametria Arquitetônica. Recife, 1999. CD-ROM.

BÖHM, J., BECKER, S., HAALA, N. Model refinement by integrated processing of laser scanning and photogrammetry. ISPRS, Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2007: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 2007.

BOITO, C. Os restauradores; trad. Paulo Mugayar Kühl, Beatriz Mugayar Kühl. Cotia: Ateliê Editorial, 3, Ed. 2008.

BORGES, M. L. V., BORGES, P. A. Aplicações práticas da Fotogrametria arquitetural na documentação de edifícios e cidades históricas, para uso efetivo por arquitetos e planejadores urbanos, restauradores e historiadores. In Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia. Recife: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1999.

BOROUCHAKI, H., GEORGE, P. L., HECHT, F., LUG, P. SALTEL, E. Delaunay mesh generation governed by metric specification. Part I. Algorithms. Finite elements in Analysis and Design. Vol. 25. Pages 61 – 83, 1997.

BOTELHO, M. F. Modelagem tridimensional de edificações usando dados do sistema Laser Scanner e imagem orbital de alta resolução espacial. Tese de Doutorado apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Curitiba, 2007.

BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P., TARSHA-KURDI, F. Automatic segmentation of building facades using terrestrial laser data. International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS, Workshop on laser scanning 2007 and SilviLaser 2007. Espoo, September, Finland, 2007.

BOULAASSAL, H., LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. International Journal of Architectural Computing - IJAC, Volume 7, Number 1, pp. 1-20, 2009.

BRETAR, F., ROUX, M. Hybrid image segmentation using LIDAR 3D planar primitives. ISPRS WG III/3, V/3 Workshop Laser scanning 2005, Enschede. The Netherlands, September 12 – 14, 2005.

BRIESE, C., PFEIFER, N. Line based reconstruction from terrestrial laser scanning data. Journal of Applied Geodesy. Volume 2, pp 85 – 95, 2008.

BRITO, J., COELHO, L. Fotogrametria Digital. Instituto Militar de Engenharia. 1º Ed. Rio de Janeiro, Brasil: 2002. Disponível em http://www.cesnors.ufsm.br/professores/aline/fotogrametria/e-book_fotogrametria_digital.pdf.

CARTA DE VENEZA. Carta internacional sobre conservação e restauração de monumentos e sítios. In: II Congresso Internacional de Arquitetos e Técnicos dos monumentos Históricos. Veneza, 1964.

CENTENO, J. A. S., WUTKE, J. D., KERSTING, A. P. B. Comparação de geração de modelos tridimensionais usando laser scanner terrestre e restituição fotogramétrica monocular. I Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2004.

CHING, F. D. K. Dicionário Visual de Arquitetura. São Paulo: Martins Forte, 1999.

CHUM, O. MATAS, J. Randomized RANSAC with $T_{d,d}$ test. Center for Machine Perception, Department of Cybernetics Prague, Karlovo, British Machine Vision Conference – BMVC, p. 448 – 457, 2002.

CLARKE, J., CARLSSON, S., ZISSERMAN, A. Detecting and tracking linear features efficiently. In Proc. 7th British Machine Vision Conference – BMVC, p. 415–424, 1996.

DEVEAU, M. Utilisation conjointe de données image et laser pour la segmentation et la modélisation 3D. Tese de Doutorado apresentada na Universidade René Descartes Paris, 2006.

DOCCI, M; MAESTRI, D. Il Rivelamento architettonico. Storia, Metodi e Disegno. Ed. Laterza & Figli. Roma, Bari 1987.

DOCCI, M; MAESTRI, D. Manuale di Rivelamento architettonico e Urbano. . Editori. Laterza & Figli. Bari – Itália, 2008.

DURUPT, M., TAILLANDIER, F. Modélisation automatique de bâtiments à partir d'un MNE et de limites cadastrales: une approche opérationnelle. 15ème congrès francophone AFRIFAFIA Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, 2006.

FILIN, G. Surface clustering from airborne laser scanner data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, part. 3A/B. Graz, Austria, 2002.

FISCHLER M. A., BOLLES R. C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communication of ACM. Vol. 24, Nº 6, p. 381–395, 1981.

GLAUS, R.: *Kinematic Track Surveying by Means of a Mult-Sensor Platform*. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, 2006.

GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. Processamento Digital de Imagens Digitais. Editora Edgard Blücher LTDA. 2000.

GOKTEPE, A., KARABORK, H., YAKAR, YILDIZ F., BAYGUL, E. 3D Modeling of Sille Aya – I Eleni Church with Laser Technology. 22nd CIPA Symposium. Kyoto, Japan, 2009.

GROETELAARS, N. J. Um Estudo da Fotogrametria Digital no Estudo das Forma Arquitetônicas e Urbanas. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFBA. Salvador, Bahia; 2004.

HARTLEY, R., ZISSERMAN, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003. On-line resources at: <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/hzbook/hzbook1.htm>.

INGENSAND, H., RYF, A., SCHULZ T. Performances and Experiences in Terrestrial Laserscanning. Proceedings of the 6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, 2003.

INGENSAND, H. Metrological aspects in Terrestrial Laser Scanner Technology. 3rd IAG – 12th Symposium, Baden, May 22 – 24, 2006.

INPE. Tutorial sobre Bancos de Dados Geográficos. GeoBrasil - 2006. http://www.dpi.inpe.br/~gribeiro/sig/tutorial_banco_dados_geografico.pdf. Acesso em agosto de 2011.

JOHANSSON, M. Explorations into the behavior of three different high-resolution ground based laser scanner in the built environment. Proceeding of the CIPA WG6. International Workshop on scanning for cultural heritage recording. 2002.

KARASAKA, L., YAKAR, M., YILDIZ, F., KORUMAZ, A. G., KARASAKA, E. 3D Modelling and Detail Drawing of Inceminare Medresseh by Digitla Photogrammetry and Laser Scanning Method. 22nd CIPA Symposium. Kyoto, Japão, 2009.

KENNIE, T. J. M., PETRIE, G. Engineering Surveying Technology, ed. Blackie Academic & Professional – USA, Halsted Press, 1993.

KERN, F. Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Braunschweig: Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Heft 19, Braunschweig, 2003.

KERSTEN, T. P., MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M., STERNBERG, H. Geometric accuracy investigations of the latest terrestrial laser scanning system. FIG Working Week, Stockholm, Sweeden 14 – 19 June 2008.

KOATZ, G. D., SEGRE, R. Levantamento do Paço Imperial da Praça XV empregando Fotogrametria de curta distância e digitalização Laser 3D. Seminário Nacional. Documentação do Patrimônio Arquitetônico com o uso de Tecnologias Digitais. ARQ. DOC 2010, Salvador, Bahia, 2010.

LAGERQVIST, B. Conservation Information System. Photogrammetry as a Base for Designing Documentation in Conservation and Cultural Resources Management. Universidade de Gotemburgo, Instituto de Conservação. Suécia, 1996.

LEONARDIS, A., BISCHOF, H., EBENSBERGER, R. Robust recognition using eigenimages. Technical Report TR-47, PRIP, TU Wien, 1997.

LICHTI, D; STEWART, M. P; TSAKIR, A. J. Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. Inn Arch of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII. B5. 2002.

LICHTI, D. D.; HARVEY, B. The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements - Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications - Ottawa, 2002.

MAAS, H. G., VOSSELMAN, G. Two algorithms for extracting Building Models from Raw Laser Altimetry Data. ISPRS Journals of Photogrammetry and Remote Sensing 54 p. 153 - 163, 1999.

MASAHARU, H., HASEGAWA, H. Three-Dimensional City Modeling from a Laser Scanner Data by Extracting Building Polygons Using Region Segmentation Method. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, 2000.

MACHADO, A. M. L. Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato. Tese de Doutorado apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Curitiba, 2006.

MCLAUCHLAN, P., JAENICKE, A. Image mosaicing using sequential bundle adjustment. In Proc. British Machine Vision Conference - BMVC, p. 616– 62, 2000.

MAILLET, H. The Laser: Principles and application techniques. Technical and Documentation, 1984.

MEDINA, S., S., S. Análise de Produtos Fotogramétricos para Cadastramento de Monumentos Históricos. Tese de Doutorado apresentada no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Curitiba, 2002.

MILLS, J., BARBER, D., BRYAN, P. An Addendum to the Metric Survey Specifications for English Heritage-the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods. 2006.
<http://www.heritage3d.org>. Acesso 25 Setembro 2010

NEVES, P. S., VIEIRA, M. L. H. Restauração e preservação quanto as cores originais da Casa do Barão. IV International Congresso n Engineering Graphics for Arts and Technical Drawing. 14º Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico. In Graphica 2000. Ouro Preto, 2000.

PFEIFER, N. Theory and Application of Laser Scanning. International Symposium of Photogrammetry Remote Sensing. ISPRS. Summer School. Ljubljana, Slovenia, Germany, 2007.

PU, S., VOSSELMAN, M.G; Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, part. 5. Dresden, Germany, 2006.

PU, S., VOSSELMAN, M.G. Building façade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images. Sensors, volume 9, pp 4525 – 4542, 2009.

RABBANI, T. S; VAN DEN HUEVEL, F.A; VOSSELMAN, G. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology. IAPRS Volume XXXVI, part 5, Dresden September, 2006.

RABBANI, T. S. Automatic Reconstruction of Industrial Installations Using Point Clouds and Images. NCG, Netherlands Geodetic Commission, Delft, The Netherlands, 2006.

RIEGL, A. The Modern Cult of Monuments: its Character and its Origins, In: *Oppositions*. Monument/Memory. New York: Rizzoli, n. 25, pp. 21-51, 1982.

RESHETYUK, Y. Calibration of Terrestrial Laser Scanner for the purposes of Geodetic Engineering. 3rd IAG – 12th Symposium, Baden, May 22 – 24, 2006.

SANTOS, N. M. Vetores e matrizes. Livros técnicos e científicos. Editora S.A., Rio de Janeiro, 1982.

SAPKOTA, P. P. Segmentation of Coloured Point Cloud Data. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands, 2008.

SCHNABEL, R., WAHL, R., KLEIN, R. Efficient RANSAC for point cloud shape detection. Computer Graphics Forum, 2007. <http://cg.informatik.uni-bonn.de/docs/publications/2006/cg-2006-2.pdf>

SCHOFIELD, W., BREACH, M. Engineering Surveying. 6^a edição. Butterworth-Heinemann Ltda., 2007.

SCHULZ, T., INGENSAND, H. Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning. FIG Working Week. Athens, Greece, May 22-27, 2004.

SCHULZ, T. Calibration of the Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Tese de Doutorado apresentada no Eidgenössische Technische Hochschule – ETH Zurich, 2007.

SHAN, J.K., TOTH, C. Topographic Laser ranging and scanning, principles and processing. ISBN-13: 978-1-4200-5142-1, 590 P., 2009.

SILVA, J. A. F. Patrimônio Histórico – da Fotogrametria Terrestre ao Laser. http://www.esteio.com.br/portugues/index.php?pagina=downloads/trab_artigos/2010.php. Acesso em 28 novembro 2011.

SIMON, L. M. Documentação de Monumentos e Sítios Históricos com apoio de Cadastro Técnico Multifinalitário e da Fotogrametria Digital. Estudo de Caso: Laguna. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFSC. Florianópolis, 2000.

TARSHA-KURDI, M., REHOR, M., LAMDES, T., GRUSSEMEYER, H., BAHR, P. Extension of Automatic Building Extraction Technique to Airborne Laser Scanner data Containing Damaged Building. International Symposium of Photogrammetry Remote Sensing – ISPRS. Proceeding XXXVI – W51, 2007.

TOMMASELLI A. M. G. Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamento 3D a Curta Distância. Geodésia online, 2003.

TORR, P. H. S. Outlier Detection and Motion Segmentation. PhD thesis, Dept. of Engineering Science, University of Oxford, 1995.

TOVARI, D. PFEIFER, N. Segmentation based robust interpolation – A new approach to laser data filtering. ISPRS WG III/3, V/3 Workshop Laser scanning 2005, Enschede. The Netherlands, September 12 – 14, 2005.

VEIGA, A. C. R. Tecnologias de Escaneamento a Laser e Engenharia Reversa aplicadas ao Patrimônio Cultural Urbano e Arquitetônico: Levantamento Métrico + Modelagem Virtual + Fotografia + Maquete + Perfilada por Usinagem. FORUM PATRIMÔNIO: Ambiente construtivo e patrimônio sustentável. Belo Horizonte, 2008.

VOSELMAN, M.G., DIJKMAN, S. 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIV-3W4Annapolis, MD, 2001.

VOSELMAN, M.G., GORTE, B.G.H., SITHOLE, G., RABBINI, T. Recognizing structure in laser scanning point cloud. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, part. 8. Freiburg, Germany, 2004.

WANG, M., TSENG, Y. H. LIDAR Data Segmentation and Classification Based on Octree Structure. In: O. Altan (ed.), Proceeding of the XXth ISPRS Congress, IAPRS, Vol. XXXV-B3, 2004.

ANEXOS

ANEXO 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER LEICA HDS3000	142
ANEXO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER REIGL LMS Z390i.....	144
ANEXO 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ESTAÇÃO LEICA TOTAL TCR -1102.....	146
ANEXO 4 - PRECISÃO DOS LEVANTAMENTOS ARQUITETÔNICOS.....	148
ANEXO 5 - PROGRAMA ELABORADO EM MATLAB.....	149

ANEXO 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER LEICA HDS3000

Leica HDS3000 Versatile, high-accuracy 3D laser scanner



Leica Geosystems HDS versatile, high-accuracy, long-range 3D laser scanner

Leica HDS3000 sets the standard

With a familiar survey instrument tool, including a 360° x 270° field-of-view, the Leica HDS3000 sets the standard for versatile, high-accuracy laser scanners. Since it was introduced, the Leica HDS3000 has become the industry's most popular laser scanner for both demanding and "everyday" as-built and topographic surveys.

Mission-critical data

Leica HDS300's high-accuracy, low-noise scan data combined with its narrow beam and ultra-fine scanning have made it the preferred choice for mission-critical projects ... when it has to be right.

Versatility and productivity

Leica HDS3000's integration of high accuracy, excellent useful range, full field-of-view, and robotic operation into a single scanner results in significantly reduced as-built survey costs for a wide range of everyday projects.

Powerful visualization

With an integrated high-resolution camera and the option to use external digital cameras, the Leica HDS3000's 3D laser scans provide users with powerful site visualization capabilities.

The right tool for the job

Fully complementary with traditional surveying methods, the Leica HDS3000 delivers significant benefits for civil, plant, architectural and related projects.

Get more information or contact Leica Geosystems for a demonstration at: www.leica-geosystems.com/hds

• when it has to be **right**

Leica
Geosystems

Leica HDS3000

Product Specifications

General	
Instrument type	Range, high-speed user scanner with survey-grade accuracy, range, and flow-of-view
User interface	Notepad or Tablet PC
Scanner drive	Servo motor
Camera	Integrative high-resolution digital camera
System Performance	
Accuracy of single measurement	
Position*	0.5 mm
Distance*	4 mm
Angle measurement	±0.01 mrad/arcsec/0.01 mrad/arcsec, one sigma
Measured surface precision/finish	2 mm, one sigma
Target acquisition	7 mm dia. aviation
Data integrity monitoring	Periodic self-check during operation and start-up
Laser Scanning System	
Type	Range, proprietary microchip
Color	Green
Laser Class	3R (IEC 60825-1)
Range	300 m @ 90%; 134 m @ 14% average
Scan rate	Up to 4,000 points/sec; maximum instantaneous rate; Average dependent on specific scan density and flow-of-view
Scan resolution	
Spot size	From 0 - 50 m @ 0 mm (FWHM - cone); 0 mm (Gaussian - cone)
Selectivity	Independently, fully swedable vertical and horizontal point-to-point measurement spacing
Point spacing	Fully swedable horizontal and vertical; 1.2 mm minimum spacing through full range
Maximum sample density	1.2 mm
Scan rate (horizontal)	20,000 points/row, maximum
Scan rate (vertical)	5,000 points/column, maximum
Flow-of-view (per scan)	
Horizontal	360° (maximum)
Vertical	270° (maximum)
Aiming/Aiming	Optical sighting using QuickScan™ button
Scanning Optics	Single mirror, parabolic; front and upper window design; Environmentally protected by housing and two glass lenses
Scan motors	Direct drive, stainless
Data & power transfer to/from rotating target	Contact-free: optical data link and inductive power transfer
Communications	Static Internet Protocol (IP) Address
Integrative color digital imaging	User-defined pixel resolution; Low, Medium, High; Single 24" x 24" image: 1024 x 1024 pixels (1 megapixel) @ 1/4 sec setting; Full 360° x 270° cone: 111 images, approx. 60 megapixels, automatically spatially rectified
Status Indication	3 LEDs (on stationary case) indicate system ready, user "on", and communications status
Base level	Internal

Electrical	
Power supply	2x V, AC or DC; not swappable; two (2) Power Supply units provided with system
Power consumption	< 10W avg.
Battery type	Sealed lead acid
Power ports	Two (2) simultaneous use, not swappable
Typical duration	10 hours; typical continuous use (room temp.)
Power status indicators	Five (5) LEDs indicate charging status and power status
Environmental	
Operating temp.	0°C to +40°C
Storage temp.	-25°C to +60°C
Lighting	Full operations between bright sunlight and complete darkness
Humidity	Non-condensing
Shock	40 G's (max. to scanner transport case)
Dust/dustiness	IEC Specification IP62
Physical	
Scanner	
Dimensions	10.1" D x 16.1" W x 20" H 265 mm x 370 mm x 510 mm w/o nose and base stands 17 kg, nominal
Weight	
Power Supply Unit	
Dimensions	6.1" D x 9.2" W x 6.1" H 165 mm x 230 mm x 155 mm w/o nose
Weight	12 kg, nominal
Stations Accessories Included	
Scanner transport case	
Trisecton (Leica Professional Series)	
Survey tripod	
Ethernet cable for connection of scanner to notebook PC	
Two Power Supply cases, Scan Inactive	
Power Supply	
Case for battery connection to scanner	
Power Supply charger	
User manual	
Counting kit	
Cyclope™ SCAN software	
Hardware Options	
Notepad PC	
Tablet PC	
HDS scan targets and target accessories	
Service agreement for Leica HDS3000	
Extended warranty for Leica HDS3000	
Notepad PC for Scanning¹	
Component	required (minimum)
Processor	1.6 GHz Pentium® or similar
RAM	512 MB SDRAM
Network card	Ethernet
Display	900+*
Operating system	Windows XP (SP1 or higher) Windows 2000 (SP2 or higher)
Cyclope™ SCAN	
Independent vertical and horizontal scan density †	
Scan filters: range, intensity †	
Selection of scan area via rectangle or pre-web †	
Atmospheric correction	
Customize longitudinal/offset geo lines	
Targeting, single- and pre-scan targeting †	
Script management for auto scan sequencing †	
View scanner locations and flow-of-view	
Level of orbit (LOC) for data visualization	

Auto recording (in-acquisition) of targets †	
Auto acquisition of HDS targets †	
Target identification	
Target and instrument height input	
Lighting control for digital images	
Acquire and display digital image	
Self image resolution (high, medium, low)	
Support of external digital images	
Real-time 3D visualization while scanning †	
Fly-around, pan & zoom, rotate camera, mirror, mouse in 3D	
View point clouds with intensity or true-color mapping	
Auto creation of panoramic digital image mosaic †	
Google digital image viewer †	
Point-and-scan QuickScan to self-orientable FoV †	
User-defined quality-of-fit checks	
Measure G dimensions: scope std., Δx, Δy, Δz	
Create, manage annotations and layers	
Save/restore views	
Save screen images	
Unoshow support	
Direct Import Formats	
Cyclope native BMP object database format	
Cyclope Object Exchange (COE) format	
ASCII point data (XYZ, XYZ PT, PDX, TDT)	
Leica X-Function DXF format, Lane ML, ZPS, ZPC, ZDD	
Direct Export Formats	
ASCII point data (XYZ, XYZ PT, PDX, TDT), DXF	
Leica X-Function DXF format, Lane ML	
Indirect Export Formats	
AutoCAD (via COE for AutoCAD plug-in)	
MicroStation (via COE for MicroStation plug-in)	
PDS (via MicroStation COE for MicroStation plug-in)	
AutoPLANT (via AutoCAD COE for AutoCAD plug-in)	
Ordering Information	
Contact Leica Geosystems or authorized manufacturer's representatives	
As specifications are subject to change without notice.	
As accuracy specifications are one sigma unless otherwise noted	
† SmartScan Technology™ feature	

* At 100% screen resolution
 † Target is moving, reducing for motion blur
 ‡ Dependent on target size
 § Minimum requirements for scanning operation are listed.
 Note: In Spain, also used for scanning.



Illustrations, descriptions and technical specifications are not binding and may change. Printed in Switzerland.
 Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland
 2006. 76300015 - V.00 - RM

Leica Geosystems AG
 Heerbrugg, Switzerland
www.leica-geosystems.com/hds

- when it has to be right

Leica
 Geosystems

ANEXO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LASER REIGL LMS Z390I

Preliminary Datasheet

**HIGH ACCURACY, HIGH RESOLUTION
3D TERRESTRIAL LASER SCANNER SYSTEM**

LMS-Z390i

The terrestrial laser scanner system RIEGL LMS-Z390i consists of a highly accurate and fast 3D scanner, associated operating and processing software RISCAN PRO, and a calibrated and definitely orientated high-resolution digital camera. The system provides data which lend itself to automatic or semi-automatic processing of scan data and image data to generate products such as textured triangulated surfaces or orthophotos with depth information.

The RIEGL LMS-Z390i is a rugged and fully portable sensor especially designed for the rapid and accurate acquisition of high-quality three dimensional images, providing a unique and unrivalled combination of wide field-of-view, high accuracy, and fast data acquisition.

A standard Windows notebook and the bundled software package RISCAN PRO enable the user to instantly acquire high-quality 3D data in the field and provide a variety of registration, post processing, 3D data viewing and export functions.

- Architecture & Facade Measurement
- As-Built Surveying
- Archaeology & Cultural Heritage Documentation
- Civil Engineering
- City Modeling
- Topography



visit our webpage
www.riegl.com

RIEGL
LASER MEASUREMENT SYSTEMS

Preliminary Datasheet

Technical Data 3D Scanner Hardware RIEGL LMS-Z390i

Rangefinder performance

Eye safety class



according to IEC60825-1:1993+A1:1997+A2:2001

The following values apply for measurements performed in the United States. Compliance with 21 CFR 101.10 and 101.11 except for deviations permitted in Laser Notice No. 50, dated July 28, 2001.

Measurement range¹⁾

for natural targets, $\rho \geq 80\%$ up to 400 m

for natural targets, $\rho \geq 10\%$ up to 140 m

Minimum range

for natural targets

1 m

for reflector targets

2 m

Accuracy²⁾

6 mm

Repeatability³⁾

4 mm (single shot), 2 mm (averaged)

Measurement rate

up to 11000 pts/sec @ low scanning rate (oscillating mirror)

up to 5000 pts/sec @ high scanning rate (rotating mirror)

Laser wavelength

near infrared

Beam divergence⁴⁾

typ. 0.3 mrad

Scanner performance

Vertical (line) scan

Scanning range 0° to 80°

Scanning mechanism rotating / oscillating mirror

Scanning rate 1 scan/sec to 20 scans/sec @ 80° scanning range

Angle stepwidth $\Delta \theta$ ⁴⁾ 0.002° $\leq \Delta \theta \leq 0.2^\circ$

between consecutive laser shots

Angular resolution 0.001°

Horizontal (frame) scan

Scanning range 0° to 360°

Scanning mechanism rotating optical head

Scanning rate⁵⁾ 0.01°/sec to 15°/sec

Angle stepwidth $\Delta \varphi$ ⁴⁾ 0.002° $\leq \Delta \varphi \leq 0.75^\circ$

between consecutive scan lines

Angular resolution 0.001°

Inclination Sensors

integrated, for vertical scanner setup position⁶⁾

Internal Sync Timer (option)

GPS-synchronized time stamping of scan data⁶⁾

General technical data

Interface: for configuration & data output

Ethernet TCP/IP, 10/100 MB/sec

for configuration

RS 232, 19.2 kBd

for data output

ECP standard (enhanced capability port) parallel

Power supply input voltage

12 - 28 V DC

Power consumption

typ. 55 W max 65 W

Current consumption @ 12 V DC

typ. 4.6 A max 5.7 A

@ 24 V DC

typ. 2.3 A max 2.85 A

Main dimensions

463 mm x 210 mm (length x diameter)

Weight

approx. 15 kg

Temperature range

0°C to +40°C (operation), -10°C to +50°C (storage)

Protection class

IP64, dust and splash-water proof

1) Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter and near to normal incidence of the laser beam. In bright sunlight, the operational range is considerably shorter than under an overcast sky.

2) One sigma @ 50 m range under RIEGL test conditions and vertical scanner setup position.

3) 0.3 mrad correspond to 30 mm increase of beamwidth per 100 m of range.

4) Selectable via Ethernet interface or RS232.

5) Horizontal scan can be disabled, providing 3D-scanner operation.

6) Specifications to be found in separate datasheet.

Information contained herein is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by RIEGL for its use. Technical data are subject to change without notice. Preliminary Data sheet, LMS-Z390i, 19/03/2007



RIEGL
LASER MEASUREMENT SYSTEMS
www.riegl.com

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH & Co. KG, Austria
Tel.: +43 3566 4371, Fax: +43 3566 4371-5, e-mail: office@riegl.com
RIEGL USA Inc., Colorado, Florida 32013, USA
Tel.: +1 407 365 8607, Fax: +1 407 365 8608, E-mail: info@rieglusa.com
RIEGL Japan Ltd., Tokyo 143-0213, Japan
Tel.: +81 3 3362 7140, Fax: +81 3 3362 5820, E-mail: info@riegl-japan.co.jp

ANEXO 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ESTAÇÃO LEICA TOTAL TCR - 1102.

TPS1100 Professional Series – Especificações técnicas

Defina o seu perfil de necessidades

Síntese dos modelos e opções

	TC	TCR	TCRM ⁺	TCA ⁺	TCRA ⁺	TCRA ⁺ Power Search
Medição angular	*	*	*	*	*	*
Medição de distâncias (IR)	*	*	*	*	*	*
Medição de dist. sem reflector e de longo alcance (RL)	–	*	*	–	*	*
Motorização	–	–	*	*	*	*
Reconhecimento Automático do Alvo (ATR)	–	–	–	*	*	*
PowerSearch (PS)	–	–	–	–	–	*
Luz guia electrónica (EGL)	–	–	–	*	*	*
Controlo remoto RCS1100	–	–	–	–	–	–
* Padrão + Opcional – Actualização posterior possível – Opção: alcance padrão + plus						

Medição angular

	Typ 1101	Typ 1102	Typ 1103	Typ 1105
Precisão				
Hz, V (ISO 17123-3)	1.5" (0.5 mgon)	2" (0.6 mgon)	3" (1 mgon)	5" (1.5 mgon)
Resolução do visor:	1" (0.1 mgon)	1" (0.1 mgon)	1" (0.5 mgon)	1" (0.5 mgon)
Método	absoluta, contínua, diametral			

Medição de distâncias (IR)

Alcance (condições atmosféricas normais)	
Prisma circular (GPR1):	3000 m
Reflector de 360° (GRZ4):	1500 m
Miniprisma:	1200 m
Película reflectora (60 mm x 60 mm):	250 m
Distância mais curta mensurável:	0.2 m com prisma circular (GPR1) / 1.5 m com reflector de 360° (GRZ4)
Precisão (ISO 17123-4) / tempo de medição	
Modo padrão:	2 mm + 2 ppm / 1.0 sec
Modo rápido:	5 mm + 2 ppm / 0.5 sec
Modo de seguimento:	5 mm + 2 ppm / 0.3 sec
Modo rápido de seguimento:	10 mm + 2 ppm / < 0.15 sec
Resolução do visor:	1 mm
Método	Princípio de medição de fase (coaxial, laser vermelho invisível)

Medição de distâncias sem reflector e de longo alcance (RL)

Alcance (condições atmosféricas normais)	
Sem reflector (alcance alargado):	170 m (Kodak Gray Card, white side)
Sem reflector (alcance padrão):	80 m (Kodak Gray Card, white side)
Distância mais curta mensurável:	1.5 m
Longo alcance c. prisma circ. (GPR1):	1000 m – 5000 m
Precisão (ISO 17123-4) / tempo de medição	
Sem reflector (modo padrão):	3 mm + 2 ppm / typ. 3–6 sec, max. 12 sec
Sem reflector (modo de seguimento):	10 mm + 2 ppm / typ. 3–6 sec, max. 12 sec
Long Range:	5 mm + 2 ppm / typ. 2.5 sec, max. 8 sec
Tamanho do ponto laser	
a 50 m:	aprox. 10 mm x 20 mm
a 100 m:	aprox. 15 mm x 30 mm
a 200 m:	aprox. 30 mm x 60 mm
Método	Princípio de medição de fase (coaxial, laser vermelho visível)

Motorizado (M)

Velocidade máxima	
Velocidade de rotação:	50 gon / sec

Reconhecimento Automático do Alvo (ATR)

Alcance no modo ATR / modo LOCK (condições atmosféricas normais)	
Prisma circular (GPR1):	1000 m / 800 m
Reflector de 360° (GRZ4):	600 m / 500 m
Miniprisma:	500 m / 400 m
Película reflectora (60 mm x 60 mm):	85 m / ---
Distância mais curta mensurável:	1.5 m com reflector de 360° (GRZ4)
Precisão / tempo de medição	
Distâncias < 300 m:	3 mm / 3 sec
Distâncias > 300 m:	1.5", 2", 3", 5" (según el tipo) / 3–4 sec
Velocidade máxima (modo LOCK)	
Tangencial (modo padrão):	25 m / sec a 100 m
Tangencial (modo de seguimento):	18 m / sec a 100 m
Radial (modo de seguimento):	4 m / sec
Método	Processamento digital de imagem (raio laser)



Levantamento topográfico profissional
A forma de levantamento topográfico precisa, rápida e inteligente

Leica
Geosystems

PowerSearch (PS)**Alcance** (condições atmosféricas normais)

Prisma circular (GPR1):	200 m
Reflector de 360° (GRZ4):	200 m (ótima orientação al instrumento)
Miniprisma:	100 m
Distância mais curta mensurável:	5 m

Tempo de busca

Tempo normal de busca:	< 10 sec
------------------------	----------

Velocidade máxima

Velocidade de rotação:	50 gon / sec
------------------------	--------------

Método	Processamento digital de imagem (feixe laser)
---------------	---

Luz guia electrónica (EGL)**Alcance** (condições atmosféricas normais)

Intervalo de operação:	5 m – 150 m
------------------------	-------------

Precisão

Precisão de posicionamento:	5 cm a 100 m
-----------------------------	--------------

Controlo remoto RCS1100

Método	Transmissão por rádio modem integrado
---------------	---------------------------------------

Unidade de comando

Visor:	8 linhas com 32 caracteres, 256*64 pixels, LCD gráfico
Teclado:	30 teclas (6 teclas de função, 12 teclas alfanuméricas)
Interface:	RS232

Bateria

Tipo:	Hidruro de níquel metal (NiMH)
Tensão:	6 V
Capacidade (GEB111):	1.8 Ah

Peso

RCS1100:	0.77 kg
Bateria (GEB111):	0.2 kg
Adaptador do bastão do reflector:	0.18 kg

Ambiente de operação

Gama de temperatura de operação:	-20°C até +50°C
Gama da temp. de armazenamento:	-40°C até +70°C
Po/água (IEC 60529):	IP54
Humidade:	máx. 95% sem condensação

Especificações gerais TPS1100

Compensador	Typ 1101	Typ 1102	Typ 1103	Typ 1105
Resolução:	4" (0.07 gon)	4" (0.07 gon)	4" (0.07 gon)	4" (0.07 gon)
Precisão:	0.5" (0.2 mgon)	0.5" (0.2 mgon)	1.0" (0.3 gon)	1.5" (0.5 mgon)
Método:	Compensador de dois eixos centralizado			
Nível	Typ 1101	Typ 1102	Typ 1103	Typ 1105
Sensibilidade do nível circular:	6" / 2 mm	6" / 2 mm	6" / 2 mm	6" / 2 mm
Resol. de indicação do nível electr.:	1" (0.1 mgon)	1" (0.1 mgon)	1" (0.5 mgon)	1" (0.5 mgon)

Luneta

Ampliação:	30x
Diâmetro livre da objectiva:	40 mm
Campo de visão:	1°30' (1.66 gon) / 2.7 m a 100 m
Focagem:	1.7 m até uma distância infinita

Unidade de comando

Visor:	8 linhas com 32 caracteres 256*64 pixels, LCD gráfico
Teclado:	30 teclas (6 teclas de função, 12 teclas alfanuméricas)
Indicação de ângulos:	360° °, 360° (decimal), 400 gon, 6400 mil, V%
Indicação de distâncias:	Meter, Int. Ft, Int. Ft/Inch, US Ft, US Ft/Inch
Quantidade:	1 / 2 (optional)

Armazenamento de dados

Cartão de memória:	PCMCIA ATA Flash (16 MB) / PCMCIA SRAM (512 KB, 2 MB)
Quantidade de ficheiros de dados:	18000 / 2 MB
Interface:	RS232

Prumo a laser

Precisão:	apresenta um desvio da linha de prumo igual a 5 mm (2 sigma) a 1.5 m
Diâmetro de pontos:	2.4 mm a 1.5 m

Parafuso sem fim

Quantidade de parafusos sem fim:	1 / 1
Curso:	sem fim

Bateria

Tipo:	Hidruro de níquel metal (NiMH)
Tensão:	6 V
Capacidade (GEB121):	3.6 Ah
Quantidade de medições:	400 – 600

Peso

Instrumento:	4.7 – 4.9 kg (10.4 – 10.8 lbs)
Bateria (GEB121):	0.4 kg (0.8 lbs)
Tripe (GDF121):	0.8 kg (1.7 lbs)

Ambiente de operação

Gama de temperatura de operação:	-20°C até +50°C
Gama da temp. de armazenamento:	-40°C até +70°C
Po/água (IEC 60529):	IP54
Humidade:	máx. 95% sem condensação

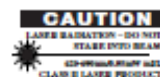
As imagens, descrições e especificações técnicas não são vinculativas, estando sujeitas a alterações.
Impresso na Suíça - Copyright Leica Geosystems AG, Hoesbrugg, Suíça, 2002. IX.02

**Distanciômetro (IR), ATR****e PowerSearch:**

Classe laser 1, em conformidade com IEC 60825-1 ou EN 60825-1
Classe laser I em conformidade com FDA 21CFR Ch. I §1040

Distanciômetro (RL, alcance padrão)**e prumo a laser:**

Classe laser 2, em conformidade com IEC 60825-1 ou EN 60825-1
Classe laser II, em conformidade com FDA 21CFR Ch. I §1040

**Distanciômetro (RL, alcance alargado):**

Classe laser 3R, em conformidade com IEC 60825-1 ou EN 60825-1
Classe laser IIIa, em conformidade com FDA 21CFR Ch. I §1040

**EGL:**

LED classe 1, em conformidade com IEC 60625-1 ou EN 60825-1

Leica
Geosystems

Leica Geosystems AG

CH-9435 Hoesbrugg

(Switzerland)

Phone +41 71 727 31 31

Fax +41 71 727 46 73

www.leica-geosystems.com

ANEXO 4 - PRECISÃO DOS LEVANTAMENTOS ARQUITETÔNICOS

Quando da execução de um levantamento cadastral das formas arquitetônicas a escolha da escala de representação é importante porque a precisão na determinação das medidas está diretamente relacionada com a escala de representação, isto é devido ao fato de existir um limite para a visualização gráfica que pode ser distinguida pelo olho humano que é de 0,2 mm. Segundo Docci e Maestri (2008) este valor encontra-se entre 0,2 a 0,3 do mm. Desta maneira, esses valores representam os limites de precisão gráfica os quais estão relacionados com o erro de graficismo.

A Tabela 13 descreve os valores de erros de grafismo para várias escalas normalmente utilizadas nos levantamentos das formas arquitetônicas (DOCCI e MAESTRI, 2008).

TABELA 13 - RELAÇÃO ENTRE A ESCALA E O ERRO DE GRAFICISMO.

Escala	Erro (cm)
1: 10	0,2 a 0,3
1: 20	0,4 a 0,6
1: 50	1 a 1,5
1: 100	2 a 3
1: 200	4 a 6
1: 500	10 a 15
1: 1000	20 a 30
1: 2000	40 a 60

Fonte: Docci e Maestri 2008.

ANEXO 5 - PROGRAMA ELABORADO EM MATLAB

Import dados 3D (X, Y, Z)

1. Inicializa com o RANSAC: escolha de um mínimo de três pontos e um limiar para determinação do plano
2. Extração do Plano
3. Função de orientação da nuvem de pontos através de plano extraído por RANSAC
4. Compara a Orientação com a precisão do sensor de inclinação do equipamento
5. Filtragem da nuvem de pontos com um limiar de acordo com as características da fachada
6. Segmentação automática da fachada determinação dos layers
7. **for** cada layer
8. **if** um layer é um “plano” da fachada projete os pontos encontrados em um plano médio e realize a triangulação de Delaunay para a determinação dos polígonos
 for cada polígono
 REFINE o polígono do layer original
 LABEL os pontos de contornos
 end for
9. **for** cada polígono refinado
 determine as retas
 determine as intersecções entre as retas encontre os respectivos pontos de intersecção para a vetorização destes polígonos
 end for
10. exportar para dxf os polígonos vetorizados